**УДК 620.172**

# ЗАВИСИМОСТЬ НДС ТИТАНО-АЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ ОТ ТОЛЩИНЫ МЯГКОЙ ПРОСЛОЙКИ*

*Л. М. ГУРЕВИЧ[1], доктор техн. наук, доцент,*
*Ю. П. ТРЫКОВ[1], доктор техн. наук, профессор,*
*Д. В. ПРОНИЧЕВ[1], канд. техн. наук, доцент,*
*М. Д. ТРУНОВ[1], магистр техники и технологии*
*([1]ВолгГТУ, г. Волгоград, Россия)*

Гуревич Л. М. – 400005, г. Волгоград, проспект имени В.И. Ленина, 28,
Волгоградский государственный технический университет,
e-mail: mv@vstu.ru

**Аннотация:** Методом конечных элементов с использованием пакета SIMULIA/Abaqus проведено моделирование зависимости поведения при растяжении плоского образца титано-алюминиевого композита ВТ6-АД1–Д20 с эллиптическим дефектом в алюминиевой прослойке от температуры испытания. Показаны различия в кривых «деформация-напряжение» и величинах относительного удлинения.

**Ключевые слова**: алюминий, алюминиевый сплав, титан, мягкая прослойка, дефект, деформация, разрушение, моделирование, метод конечных элементов, температура.

**Введение**

Для получения при статических или квазистатических испытаниях прочностных свойств материалов результатов, близких к реальным условиям эксплуатации деталей сложной формы с микро и макродефектами, возникающими в процессе изготовления либо эксплуатации, часто используют образцы с концентраторами напряжений различной формы [1, 2]. Временное сопротивление разрушению в этом случае оценивают по отношению разрушающего усилия к сечению в месте дефекта. В последние годы в связи с развитием вычислительных возможностей компьютерной техники стали использовать моделирование методом конечных элементов поведения слоистого композиционного материала с дефектами различных формы и размеров, так в [3] показаны результаты моделирования эволюции профиля кольцевых канавок в алюминиевой прослойке образцов титано-алюминиевого слоистого композита, проведенного с использованием пакета программ SIMULIA/Abaqus.

Целью настоящей работы является исследование изменения прочности и напряженно-деформированного состояния плоских образцов слоистого титана-алюминиевого композита с осевыми эллиптическими отверстиями при повышении температуры.

**Моделирование методом конечных элементов**

Моделирование процессов эволюции напряженно-деформированного состояния при растяжении плоского образца трехслойного титано-алюминиевого композита ВТ6–АД1–Д20 (толщина и ширина рабочей части соответственно 5 и 10 мм) проводилось по модели Мизеса с использованием модуля Abaqus/Explicit программного комплекса SIMULIA/Abaqus. По центру мягкой прослойки из алюминия АД1 (толщина от 1,25 до 5 мм) выполнялось эллиптическое отверстие (большая и малая оси соответственно 2,0 и 0,5 мм), перпендикулярное широкой плоскости образца. Свободный торец слоя Д20 закреплялся, а торец слоя ВТ6 перемещали со скоростью 1 мм/с. Моделирование деформации продолжалось до разрушения первых ячеек алюминиевого слоя. Моделирование проводилось целиком всего объема тела без использования приемов, основанных на симметричности объекта (2D-моделирование; моделирование поведения половины или ¼ образца с наложением соответствующих граничных условий), что повышало затрачиваемое машинное время, но увеличивало достоверность расчета и позволяло учесть поперечные деформации ячеек. Законы упрочнения упруго-пластичных материалов задавались по модели пластичности Джонсона–Кука [4, 5], позволяющей получать семейство кривых «деформация - предел текучести» при различных температурах. Предельные деформации, с которых высока вероятность разрушение алюминия (АМг6), рассчитывали по модели разрушения Джонсона–Кука [6, 5], в соответствии с которой разрушение ячейки начинается, если параметр поврежденности D равен 1:

$$D = \frac{1}{\varepsilon_f} \sum_i \Delta\varepsilon_p^i,$$

$$\varepsilon_f = \left[ D_1 + D_2 \exp\left( D_3 \frac{p}{\sigma_{ef}} \right) \right] \left( 1 + D_4 \ln \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right) \left( 1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right), \quad (1)$$

где $\Delta\varepsilon_p^i$ – приращение эффективной пластической деформации в конечном элементе на i-м шаге интегрирования, $D_1 \ldots D_5$ – табличные параметры для анализируемого материала; $\sigma_{ef}$ – эффективное напряжение; $p$ – давление в рассматриваемой ячейке.

Таблица 1 – Коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука

| Материал | Толщина, мм | Коэффициенты для модели пластичности [7] | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A, МПа | B, МПа | m | n | $\dot{\varepsilon}_0$, сек$^{-1}$ | $T_m$, K | $T_r$, K |
| Алюминиевый сплав Д20 | 10 | 218,3 | 704,6 | 0,93 | 0,62 | 1 | 873 | 293 |
| Алюминий АД1 | 5 | 60,0 | 6,4 | 0,859 | 0,62 | 1 | 933 | 293 |
| Титановый сплав ВТ6 | 10 | 420,0 | 52 | 1,00 | 0,48 | 1 | 1940 | 293 |

Используемые параметры для моделей деформирования и разрушения составляющих композита (из-за значительно более высокой прочности титановой прослойки возможность ее разрушения не рассматривалась) приведены в таблицах 1 и 2 [6, 7]. В большей части объема моделируемого образца использовалась конечно элементная сетка со стороной кубических ячеек 0,25 мм, вдоль периметра отверстия размещалось 100 Hex-ячеек, а по толщине алюминиевой прослойки 40 слоев ячеек.

Таблица 2 – Коэффициенты для модели разрушения Джонсона–Кука

| Материал | Коэффициенты для модели разрушения [6] | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ | $D_4$ | $D_5$ | $\dot{\varepsilon}_0$, сек$^{-1}$ | $T_m$, K | $T_r$, K |
| Алюминиевый сплав Д20 | 0,178 | 0,389 | –2,246 | 0 | 0 | 1 | 873 | 293 |
| Алюминий АД1 | 0,071 | 1,428 | –1,142 | 0,0097 | 0 | 1 | 933 | 293 |

**Результаты и обсуждение**

На начальных стадиях пластическая деформация развивалась только в алюминиевой прослойке и была очень неравномерна по объему. В прослойке толщиной 5 мм в пластическая деформация локализовалась преимущественно вблизи дуговых поверхностей большой оси эллиптического отверстия и (несколько слабее) в углах вблизи границ раздела со слоями Д20 и ВТ6 (рис. 1, а, б). По мере роста удлинения образца деформация распространялась еще и по диагональным плоскостям, соединяющим вышеуказанные участки. В образцах с толщиной алюминиевой прослойки от 2,5 до 1,25 мм (рис.1, в и г) пластическая деформация развивается около дуг большой оси эллиптического отверстия и вдоль границ со слоями Д20 и ВТ6. Увеличение температуры до 200 °С приводило к развитию деформации вдоль диагональных плоскостей при толщине АД1 5 мм (рис. 1, б) и границ с соседними слоями при толщине АД1 2,5 – 1,25 мм. Первичное разрушение во всех случаях наблюдалось в ячейках вблизи дуговых поверхностей большой оси эллиптического отверстия.

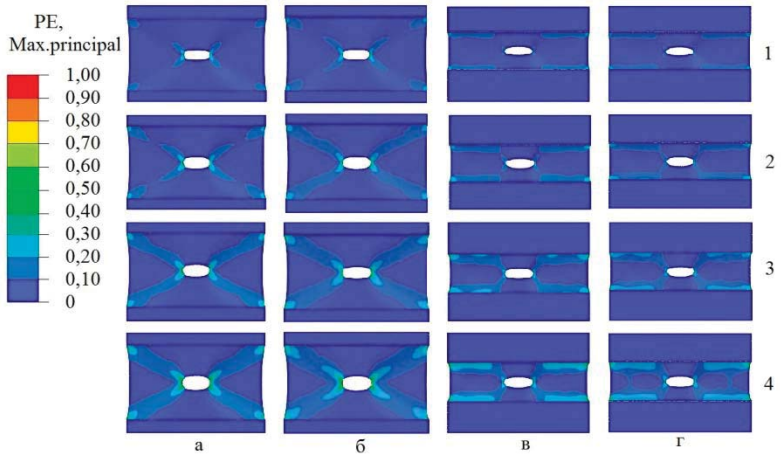
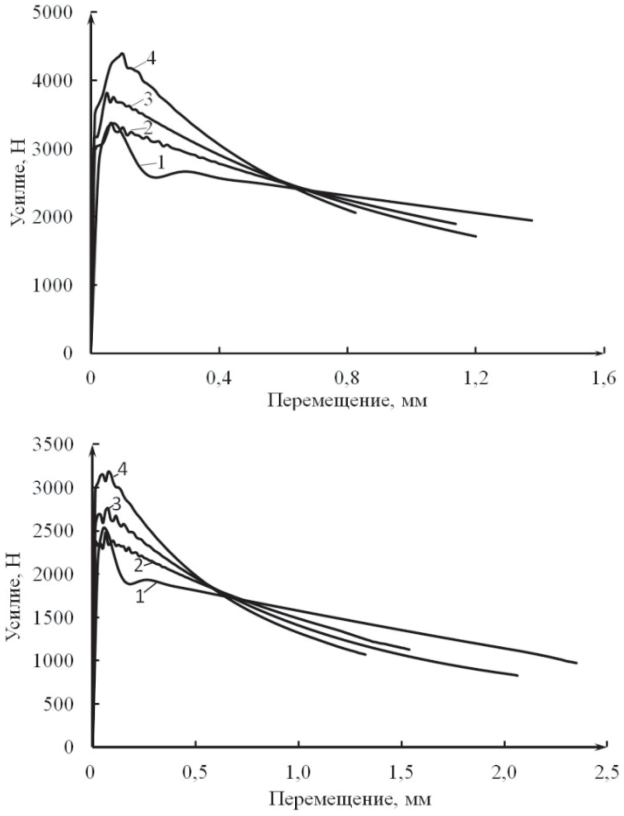



Рисунок 1 – Распределение пластической деформации по объему алюминиевой прослойки толщиной 5 (а, б) и 1,25 мм (в, г) при моделируемых температурах 20 °С (а, в) и 200 °С (б, г) и величине относительной деформации прослойки: I – ε = 5%; II – ε = 6,5%; III – ε = 7,8%; IV – ε = 10%.

Формы кривых «осевая абсолютная деформация образца-осевое усилие» (рис. 2) близки для всех моделируемых толщин мягкой прослойкой с экстремумом при перемещении около 0,15 мм и последующим снижением по мере развития шейки. Уменьшение толщины прослойки приводило к росту максимального осевого усилия, после которого начинается формирование шейки, а также к разрушению при меньших величинах деформации. Эффект повышения прочности слоистых композитов по мере уменьшения толщины мягкой прослойки, хорошо известный для сварных соединений и слоистых композитов без дефектов, получил название контактного упрочнения. Классическими для его объяснения в сварных швах стали работы О. А. Бакши с сотрудниками [8], а описание контактного упрочнения слоистых композитов широко использовалось в работах Ю. П. Трыкова с сотрудниками [9].




*а)* *б)*

Рисунок 2 – Кривые «осевая абсолютная деформация образца-осевое усилие» при 20 °С (а) и 200 °С (б) для моделируемых толщин алюминиевой прослойки: 1 – 5 мм; 2 – 2,5 мм; 3 – 1,8 мм; 4 – 1,25 мм

При контактном упрочнении развитие пластических деформаций в прослойке сдерживается работающими упруго более прочными соседними металлами, в результате на контактных поверхностях возникают (и с ростом нагрузки увеличиваются) касательные напряжения, что приводит к эволюции напряженного состояния в прослойке из одноосного в неоднородное трехосное, что вызывает повышение прочностных характеристик. Формирование шейки и уменьшение фактической площади образца приводит к снижению осевого усилия растяжения, причем более интенсивному у образцов с малыми толщинами мягкой прослойки. Различия в скоростях снижения усилия приводит при абсолютных деформациях более 0,6 мм к тому, что усилия, необходимые для дальнейшего растяжения образцов с малыми толщинами, ниже, чем у образцов с толстыми прослойками. Повышение температуры моделирования до 200 °С (рис 2, б) при сохранении форм кривых вызывало примерно на 30% снижение экстремальных значений осевого усилия для всех толщин прослойки и увеличению на 50-70 % деформации образцов, при которой начинались разрушения первых ячеек.

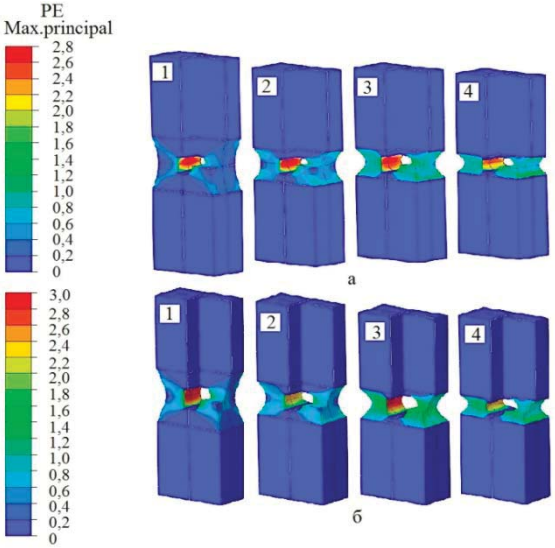



Рисунок 3 – Распределение значений суммарной деформации по объему моделируемых образцов с различными толщинами алюминиевой прослойки в момент разрушения первой ячейки при 20 °С (а) и 200 °С (б): 1 – 5 мм; 2 – 2,5 мм; 3 – 1,8 мм; 4 – 1,25 мм

Максимальные значения напряжений Мизеса наблюдаются в слоях Д20 и ВТ6 вблизи границы раздела с алюминиевой прослойки вне зоны проекции концентратора напряжения и достигают 150 МПа при нормальной температуре и 110 МПа при 200 °С. Распределение значений суммарной деформации по объему моделируемых образцов с различными толщинами алюминиевой прослойки в момент разрушения первой ячейки при температурах 20 и 200 °С показаны на рис. 3 (для большей наглядности часть образца удалена). Максимальная локальная суммарная деформация (до 280% при 20 °С и 300% при 200 °С) сконцентрирована в алюминии вблизи дуговой поверхности эллиптического отверстия в зоне большой оси, причем она увеличивается по мере удаления от свободной поверхности образца. Уменьшение толщины прослойки приводит к вовлечению в пластическую деформацию практически всего объема алюминия. Рост температуры вызывал при равенстве толщин мягких прослоек вовлечение в пластическую деформацию большего объема алюминия, что особенно хорошо заметно при относительно больших толщинах АД1.

**Выводы**

Методами компьютерного моделирования растяжения образцов из слоистых титано-алюминиевых композитов с эллиптическим концентратором напряжений и различными толщинами мягкой прослойки показана зависимость распределения напряжений Мизеса и деформаций от температуры испытаний. Увеличение температуры до 200 °С приводит к развитию деформации вдоль диагональных плоскостей при толщине АД1 5 мм и границ с соседними слоями при толщине АД1 2,5 – 1,25 мм.

Формы кривых «осевая абсолютная деформация образца-осевое усилие» имеет близкий характер для всех моделируемых вариантов толщины мягкой прослойки с экстремальными значениями осевых усилий в области деформации образца 0,15-0,20%. Подтверждено влияние эффекта контактного упрочнения на величину максимального усилий, после которого начинается формирование шейки. Повышение температуры до 200 °С при сохранении форм кривых вызывает примерно на 30% снижение экстремальных значений осевого усилия и увеличению на 50-70 % деформации, при которой начинались разрушения первых ячеек.

## Список литературы

1. *Багмутов, В. П.* Закономерности сопротивления пластическим деформациям при растяжении цилиндрических образцов с кольцевым надрезом / В. П. Багмутов, В. И. Водопьянов, О. В. Кондратьев, А. И. Горунов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(59) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – С. 105–109.

2. *Багмутов В.П., Водопьянов В.И., Кондратьев О.В., Бабичев С.В.* Влияние концентраторов на сопротивление упругопластическому растяжению / В. П. Багмутов, В. И. Водопьянов, О. В. Кондратьев, С. В. Бабичев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. № 6. 2005. Том 71. - С. 47 50.

3. Моделирование поведения титано-алюминиевого композита с дефектом в мягкой прослойке / Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Шморгун В.Г., Голик А.А. // Известия ВолгГТУ. Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений». Вып. 7 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 20 (147). - С. 43-46.

4. *Johnson G. R., Cook W. H.* A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures //Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. – 1983. – Т. 21. – С. 541-547.

5. *Гуревич, Л.М.* Исследование с помощью компьютерного моделирования контактного упрочнения алюминиевой прослойки при растяжении магниево-алюминиевых композитов / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, А. А. Голик, И. А. Пономарева, В. Н. Арисова // Вестник Сибирского гос. индустриального ун-та. - 2014. - № 3. - С. 23-28.

6. *Johnson G. R., Cook W. H.* Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures //Engineering fracture mechanics. – 1985. – Т. 21. – №. 1. – С. 31-48.

7. *Кузькин, В. А. Михалюк, Д. С.* Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона-Кука при высокоскоростном деформировании алюминия // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3, №1. – С. 32–43.

8. *Бакши, О. А.* Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой / О. А. Бакши // Сварочное производство. 1962. № 5.- С.35-46.

9. *Трыков, Ю.П.* Композиционные переходники: монография / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, Д. В. Проничев. - Волгоград: РПК "Политехник", 2007. - 328 с.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00158)

## THE IMPACT OF SOFT INTERLAYER WIDTH ON THE STRESS-STRAIN STATE OF TI-AL COMPOSITE WITH ELLIPTICAL HOLE

**Gurevich L. M.**[1], D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: leongur666@gmail.com,
**Trykov Yu. P.**[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mv@vstu.ru,
**Pronichev D. V.**[1], C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: avatar@mail.ru,
**Trunov M. D.**[1], M.Sc. (Engineering), e-mail: Mikhail.trunov@gmail.com

[1]Volgograd State Technical University, 28, Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russia

**Abstract:** In this study FEM was applied to investigate the stress-strain behavior of the Ti-Al-Al alloy laminated metal composite under tensile loads. The FEM simulation was performed using SIMULIA/Abaqus software for various temperatures of the composite. The simulation considered elliptical hole in Al interlayer. The difference between stress-strain curves for and elongation values were identified.

**Keywords***:* aluminum, aluminum alloy, titanium, soft layer, defect, deformation, destruction, simulation, FEM, temperature.

**УДК 629.78**

# ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР ПОВЫШЕННОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ В ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ И СТАЛЯХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ СПЕКАНИЯ И ШЛИФОВАНИЯ

*Ю. Г. ГУЦАЛЕНКО, старший научный сотрудник*

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Фрунзе, 21, Харьков, Украина, 61002, gutsalenko@kpi.kharkov.ua

**Аннотация:** Рассматриваются и объясняются процессы формирования электроразрядными технологиями высокоплотных тонкодисперсных структур в результате спекания и шлифования твердых сплавов, а также шлифования сталей с образованием в них белых слоев. Предложена теория прогнозирования оптимального давления в рабочих процессах предварительного (искрово-плазменное спекание) и окончательного (алмазно-искровое шлифование) формообразования порошковой керамики. Подход основан на законе Пашена-Пеннинга для энергетической минимизации осуществимости электрического разряда по напряжению пробоя в приложении к максимальной текущей локальной пористости объекта технологии. Максимальной исходной порой допускается вакансия единичного зерна в его объемной интерпретации сферической моделью. Полученный теоретически оптимальный результат для исходной зернистости порошковой смеси 40…80 нм (10…20 МПа) симметричен и близок оптимальной практике (7,5…25 МПа). Зависимость величины сжимающих напряжений в токопроводной керамике от контактной механической нагрузки при алмазно-искровом шлифовании имеет аналогичный экстремальный характер.

**Ключевые слова:** искрово-плазменное спекание, алмазно-искровое шлифование, токопроводные материалы, электрический разряд, подавление пористости, белый слой, сжимающие напряжения, микротвердость.

**Введение**

Высокая износостойкость тугоплавких керамик, особенно на вольфрамокарбидной основе, устойчиво поддерживает их привлекательность в различных инструментальных и конструкционных применениях. При этом повышение их функциональности объективно связывается с формированием высокоплотных тонкодисперсных структур технологиями порошковой металлургии. Эффективным методом получения таких структур является разработанное в Японии и развиваемое ведущими технологическими державами искрово-плазменное спекание (SPS – spark plasma sintering), использующее прямой нагрев электрическим током исходно порошкового содержимого рабочей камеры консолидации под давлением, сопровождающийся действием электрических разрядов в уплотняемой среде. С оглядкой на собственный и мировой опыт, современным лидером разработки метода в стране приоритета (М. Токита) особо выделяется роль электрических разрядов в результатах его применения и в этой связи российский технологический исток (Б. Р. и Н. И. Лазаренко, 1943 г.) в его предтечах [1].

Последующее шлифование токопроводной SPS керамики с одновременным воздействием на ее поверхность электрическими разрядами позволяет дополнительно улучшить структуру и микротвердость в поверхностном слое с формированием в нем сжимающих остаточных напряжений, и тем самым функциональность готового изделия [2].

При импульсной обработке поверхности сталей со скоростями нагрева порядка $10^5$-$10^6$ К/с до температур фазовых превращений (выше Ac3) вплоть до плавления с немедленным охлаждением со скоростями не ниже $10^3$-$10^4$ К/с в них также формируются специфические переходные структуры между обычной закалкой и аморфным состоянием повышенной твердости (белые слои), обычно включающие высокодисперсный мартенсит, остаточный аустенит, карбициды и (в отдельных случаях) феррит [3]. Формирование таких структур в сталях характерно для интенсивного алмазно-искрового шлифования (АИШ), сочетающего механическое резание и импульсную электроэрозионную обработку [4]. Неизбежно сопровождающее механическое резание сталей их пластическое деформирование также способствует формированию белых слоев при АИШ, как и при термофрикционной обработке [3]. В результате фазовых структурных превращений и пластического деформирования в формируемых белых слоях повышенной твердости возникают остаточные напряжения сжатия, что, как и после АИШ токопроводной керамики, обусловливает повышенную контактную работоспособность.

Однако механизмы формирования эксплуатационно оптимальных структур в технологиях керамики и сталей имеют существенные отличия. Представленная работа связана с выделением, теорией и практикой учета этих отличий в организации технологических процессов SPS и АИШ керамик (в том числе твердых сплавов на основе карбида вольфрама), а также АИШ сталей с целью формирования в них структур повышенной функциональности.

Предлагаемый теоретический подход к режимной оптимизации SPS консолидации токопроводных порошковых керамик обусловлен исходной пористостью консолидата и необходимостью ее последовательно эффективного преодоления как типичной технологической наследственности заготовительных производств порошковой металлургии в технологиях инструментальной и конструкционной керамики.

**Теория оптимальной SPS консолидации**

Сущность улучшения спекания и уменьшения роста зерен в производстве порошковой керамики состоит в опережающей рост зерен активации уплотнения и более энергичном его протекании. В теоретических представлениях электроконсолидационных процессов [5] с увеличением концентрации электрополярных линий в зонах обтекания электрическим током пор с большим поперечным размером формируются и большие градиенты температур. Это принуждает структурные вакансии к диффундированию из окружения больших пор в сторону меньших, выравнивая плотность электрического поля вместе с увеличением числа и (или) размера меньших пор за счет размерного стеснения больших пор, как отмечается в [5]. Одновременно облегчаются условия их электроразрядного преодоления в ходе электроконсолидации.

Ролевые функции искровых разрядов в этом процессе связываются со скольжением по межзеренным границам [6] и действием непосредственно в промежутках пористости. Под углом зрения энергоэффективного преодоления (уменьшения) пористости наибольший интерес представляет создание условий минимизации потенциала зажигания электрических разрядов в газовых средах пор спекаемого под давлением консолидата. В результате пробойные возможности реализуются с минимумом числа пор, обойденных прямым электроразрядным действием.

Эффективное подавление пористости в SPS консолидации порошковых систем предлагается производить под давлением, величина которого обеспечивает минимальное напряжение пробоя электрическим разрядом пустот, характерных для текущего состояния консолидата.

В экспериментальной физике испытывающих управляемое давление однокомпонентных газовых сред известны минимумы $U_{пр\,\min}$ потенциала $U_{пр}$ зажигания в них электрических разрядов, следующие из экстремальных кривых Пашена [7]. В соответствии с законом Пашена $U_{пр\,\min} = const$ для данной газовой среды соответствует некоторому однозначно определенному постоянству произведения $P{\cdot}h = (P{\cdot}h)_{opt}$ величин исходного давления $P$ и разрядного промежутка $h$. Известен также эффект Пеннинга [8] , состоящий в дополнительном понижении минимумов Пашена в компаундных газовых структурах с присутствием примесей, потенциал энергии возбуждения метастабильного уровня которых ниже, чем в чистом основном газе, в том числе во влажных средах с однокомпонентной газовой основой.

Тогда, исходя из определяющей роли электроразрядного фактора и экспериментальных закономерностей Пашена-Пеннинга, можно предположить, что оптимальное давление прессования $P_{opt}$ при нанопорошковой электроконсолидации, во всяком случае в первом приближении, подчиняется зависимости вида $P_{opt} = k{\cdot}(P{\cdot}h)_{opt}/h$, где $h$ – размерная характеристика нанопорошка (диаметр зерна в сферической модели), $k$ – поправочный коэффициент, учитывающий состав газовой среды; криволинейность геометрии промежутка в порах (кривые Пашена получены в экспериментальных условиях с плоскими электродами и однородным электрическим полем); известную приближенность закона Пашена и тем большую точность, чем меньше $P$ и $h$, и, в то же время (по некоторым экспериментальным данным), искажения начального участка кривой Пашена при пробое малых разрядных промежутков (при одновременно малых $P{\cdot}h$ и $h$), объясняемые поддержанным туннелированием эффектом Шоттки; теплофизический фон и др.; в общем случае $k > 0$ и, в частности, с повышенным ожиданием $0 < k < 1$ в исходно нормально влажных средах реального компактирования.

Априорно можно утверждать, что необходимой доказательной основой справедливости гипотезы об определенном подчинении оптимального давления прессования при электроконсолидации закону Пашена применительно к технологиям наноструктурной тугоплавкой керамики является относительная близость (в пределах одного порядка) величин расчетного давления при $k = 1$ (с использованием кривой Пашена для доминирующего газа среды спекания) и из реальной опытно-экспериментальной оптимизационной практики. Доказательной основой справедливости гипотезы о пропорциональном подчинении – относительная близость величин $k$ для соотношений $k = P_{opt}{\cdot}\ h\ /\ (P{\cdot}h)_{opt}$, полученных с использованием $(P{\cdot}h)_{opt}$ Пашена и данных о $P_{opt}$ (диапазоне изменения $P_{opt}$) в практике работы с порошками (смесью порошков)

разных зернистостей в одной и той же среде спекания.

Например, из разрешения закона Пашена для газовоздушной среды (в приближенной оценке $U_{np\,\min} = 0{,}35\ B$ при $(P{\cdot}h)_{\text{opt}} = 0{,}8\ Па{\cdot}м$) для порошковой смеси с исходными размерами зерен в диапазоне от 40 до 80 нм следует диапазон $P_{opt}$ от 10 до 20 МПа, с последовательной ориентацией на преимущественное подавление от более крупных исходных пор, максимальных для зернистости 80 нм (расчетное значение $P_{opt} = 10$ МПа) , к максимальным для зернистости 40 нм (расчетное значение $P_{opt} = 20$ МПа).

**Условия обсуждаемых экспериментальных исследований**

Порошковая смесь с исходными размерами зерен в диапазоне от 40 до 80 нм по приведенному примеру теоретического расчета диапазона $P_{opt}$ соответствует реальной SPS практике [9] получения высокоплотных тонкодисперсных равновесных (50/50 мас. %) $Al_2O_3$–WC композитов, когда исходные порошки имели зернистость 40…70 нм (WC) и 60…80 нм ($Al_2O_3$).

Остаточные напряжения в поверхностном слое после алмазно-искрового шлифования токопроводного карбида вольфрама с изменяемым фиксированным усилием прижима инструмента к поверхности обработки в диапазоне 0…1,2 МПа изучены в диссертационном исследовании [2].

Характеристики структуры поверхностного слоя в стали 65Г после финишной поддержки алмазно-искровым шлифованием белого слоя от предварительной термофрикционной обработки приводятся в системном представлении по работе [10].

**Результаты и обсуждение**

В поддержанном давлением рассматриваемом SPS электроконсолидационном опыте получения композитов повышенной функциональности, соответствующем примеру теоретического расчета диапазона $P_{opt}$ для первых стадий спекания, диапазон давлений первых ступеней цикла подавления пористости составляет примерно от 7,5 до 25 МПа [9].

Из сопоставления установленных опытно-экспериментальным путем и из $(P{\cdot}h)_{opt}$ по Пашену значений давлений на границах диапазона исходной максимальной пористости, соответствующего по [11] диапазону исходной зернистости спекаемых порошков, следует, что теоретический диапазон является внутренним по отношению к опытному с отклонениями каждой границы опытного диапазона на 25 %. При этом коэффициент $k$ соответственно изменяется от $k = 0{,}75$ (нижняя граница) до $k = 1{,}25$ (верхняя граница). Таким образом обеспечивается повышенная надежность формирования оптимальных условий электроразрядного подавления пористости в условиях реальной форморазмерной статистики максимальных пор, в контексте [11] приближенно описываемых сферической моделью зерна. При этом условия выдержки $P_{opt} = 25$ МПа уже соответствуют запуску как преобладающего механизма деформационной реструктуризации спекаемого компаунда с уплотнительным скольжением границ смежных зерен друг относительно друга.

В АИШ полученного спеканием под давлением с прямым токоподводом монокарбида вольфрама формирование его функционально оптимальной высокоплотной приповерхностной структуры с достижением наилучших физико-механических свойств по критерию напряженного состояния шлифованного материала также происходит при некотором оптимальном значении давления, как это следует из [2].

В сталях, по сравнению с тугоплавкими керамиками обладающих меньшей эрозионной стойкостью и большей податливостью тепловому действию электрического тока, под действием электрических разрядов и механического давления в условиях АИШ также наблюдается формирование упрочненного поверхностного слоя повышенной твердости. Наблюдаемая измененная структура с признаками частичной аморфизации (белый слой), что не обнаруживается в обработке керамик, своим происхождением обязана характерной сталям повышенной пластичности и объемной плотности, что меняет преимущественные акценты в проявлении и наследственности электрических разрядов, отражаемой повышением нижней границы и среднего значения микротвердости в зоне белого слоя толщиной порядка 0,5 мм (таблица, сталь 65Г) [10].

Таблица

| Характеристика | | После ТФО | После АИШ |
|---|---|---|---|
| Микротвердость, МПа | Основной металл (среднее) | 5,3 | |
| | Белый слой | 8,2-11,2 | 9,0-11,0 |
| Мартенситная микроструктура | Основной металл | Игольчатая | |
| | Белый слой | Деформированная зернистая | |

**Выводы**

Предложенный приближенный расчетный подход к определению исходных давлений прессования на начальных этапах реализации полного технологического цикла нанопорошковой SPS электроконсолидации согласуется с практикой и рекомендуется к применению в опытно-экспериментальных разработках промышленных технологий тугоплавкой керамики.

В АИШ после SPS формирование функционально оптимальной по критерию напряженного состояния шлифованного материала высокоплотной поверхностной структуры также подчиняется экстремальной зависимости от величины давления в шлифовальном рабочем контакте.

В измененной поверхностной структуре стали с признаками частичной аморфизации (белый слой) в результате АИШ, наследующей дефор-мированный зернистый мартенсит, предположительно в локализациях, определяемых миграциями пятен каналов электрических разрядов в электромеханическом контакте алмазного инструмента на металлической связке и обрабатываемой токопроводной заготовки, проявляется импульсная «раскачка» и последующее изменение характера и энергетической структуры связей в кристаллической решетке и межкристаллитных.

Работа выполнена по комплексному проекту ХНУ, НТУ «ХПИ», УГУЖТ (г. Харьков) и СГУ (г. Сумы) «Многокомпонентные композиционные материалы и покрытия на основе наносоединений тугоплавких металлов», номер государственной регистрации 0113U001340 (Украина).

## Список литературы

1. *Tokita M.* Recent Advanced Spark Plasma Sintering (SPS). Technology, Systems and Applications in Japan [Электронный ресурс] // 2-я международная школа-семинар «Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей»); г. Москва, Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 20-23 мая 2013 г. : [сайт]. URL : http://lemc-lab.mephi.ru/content/file/news/tokita.pdf (дата обращения: 29.05.2015).

2. *Стрельчук Р. М.* Визначення особливостей та раціональних умов алмазно-іскрового шліфування твердих сплавів з нанорозмірних зерен монокарбіду вольфраму : Дис. … канд. техн. наук: 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти / Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». Х., 2011. 193 с.

3. *Бабей Ю. И.* Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. К. : Наук. думка, 1988. 237 с.

4. *Фукс М. С., Беззубенко Н. К., Свердлова Б. М.* Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльборовой обработки. К. : Вища шк., 1979. 160 с.

5. *Райченко А. И.* Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. М. : Металлургия, 1987. 128 с.

6. Dense nanostructured materials obtained by Spark Plasma Sintering and Field Activated Pressure Assisted Synthesis starting from mechanically activated powder mixtures / F. Berhard, S. Le Gallet, N. Spinassou et al. // Science of Sintering. 2004. No. 36 : 155-164.

7. *Paschen F.* Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure beiverschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz // Annalen der Physik und Chemie. 1889. Vol. 5 (273) : 69-96.

8. *Penning F. M.* Electrical Discharges in Gases. New York : Macmillan, 1957. 118 p.

9. *Геворкян Э. С., Гуцаленко Ю. Г.* Подбор оптимальных режимов горячего прессования нанопорошковых смесей $Al_2O_3$–WC для инструментальных применений // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010. №5/1(47). С. 13-18.

10. *Gutsalenko Yu.* Diamond-spark grinding in forming of functional white layers of increased microhardness in steels // Fiability & Durability. Targu Jiu : Editura “Academica Brancusi”, 2008. No. 2 : 1-3.

11. *Гусев А. И., Ремпель А. А.* Нанокристаллические материалы. М. : Физматлит, 2001. 224 с.

# FORMATION OF STRUCTURES OF INCREASED FUNCTIONALITY IN HARD ALLOYS AND STEELS BY SINTERING AND GRINDING UNDER ELECTRIC DISCHARGE TECHNOLOGIES

**Gutsalenko Yu. G.**

National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», 21, Frunze str., 61002, Kharkov, Ukraine, gutsalenko@kpi.kharkov.ua

**Abstract.** It is for the first time that the attempt of the combined review and explanation of the formation processes of high-density fine increased functionality structures as a result of sintering and grinding of carbide and steel grinding under electric discharge technologies is being made. The problems of predicting the optimum conditions of the implementation of the working processes for the prior (spark-plasma sintering) and final (diamond-spark grinding) forming of the objects of the nanopowder materials science innovations that are corresponding to modern sixth technological order are being actualized from the position of accelerating their effective implementation. The formation of a white layer in the steel at the diamond- spark grinding is being considered. Physical features and benefits of spark-plasma sintering and diamond-spark grinding technologies combined with direct current feeder to the operating area are caused by the action of electrical discharges. The pressure which effect on the object of the working process is the controlled parameter and the variation factor in the search the best technical result in practice of both technological methods. The ability of optimization of the spark-plasma sintering and diamond-spark grinding processes by controlling of this parameter of the processing mode is being theoretically grounded and practically shown. The approach is based on Paschen-Penning's law for energy minimization of feasibility of electric discharge under breakdown voltage as for the maximum current local porosity of the object of technology. Vacancy of a single grain in its volume interpretation of a spherical model is accepted as an initial pore. The theoretical optimal result (10...20 MPa) which is got for the powder mixture with the original granularity of 40...80 nm is symmetric and close to the best practice (7,5...25 MPa). The dependence of the compressive stress in the electrically conductive ceramics from the contact mechanical load when diamond- spark grinding has a similar extreme character. It is shown that the diamond-spark grinding of white layer in steel after thermofrictional treatment raises the lower limit and the average value of the microhardness in it.

**Keywords.** spark-plasma sintering, diamond-spark grinding, electrically conductive materials, electrical discharge, suppression of porosity, white layer, compressive stresses, microhardness.

**УДК 629.78**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗИИ БОРА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ МНОГОКОМПОНЕНТНОМ НАСЫЩЕНИИ УГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ БОРОМ, ХРОМОМ И ТИТАНОМ

*С. Г. ИВАНОВ, к.т.н., e-mail serg225582@mail.ru*
*М. А. ГУРЬЕВ, к.т.н., e-mail gurievma@mail.ru*
*Т. Г. ИВАНОВА, аспирант, e-mail serg225582@mail.ru*
*А. М. ГУРЬЕВ, к.т.н., e-mail gurievam@mail.ru*

ФБГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46

**Аннотация:** Проведен эксперимент по насыщению разных сталей бором с целью выявления механизма диффузии и определения коэффициента диффузии. В качестве экспериментальных сталей были выбраны сталь Ст3, 5ХНВМФ, Х12М. Определение коэффициента диффузии проводили весовым способом. Определены коэффициенты диффузии бора при одновременном комплексном насыщении бором, хромом и титаном. Определение коэффициента диффузии и энергии активации проводили путем частного решения второго закона Фика в условиях диффузии из бесконечно мощного постоянного источника диффузии.

**Ключевые слова:** химико-термическая обработка, упрочнение, сталь, диффузия, борирование.

**Введение**

Проблема повышения эффективности работы машиностроительной отрасли заключается в повышении качества выпускаемой продукции, одновременно со снижением металлоемкости производства, что в свою очередь, влечет снижение себестоимости и повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции. Для решения этой проблемы наряду со снижением металлоемкости производства, повышения ресурсо- и энергоэффективности производства, разработки и внедрения новых материалов и технологий, необходимо повышать технологический и эксплуатационный уровень материалов.

Одним из основных, наиболее перспективных и практически повсеместно осуществимым способом нанесения покрытий является химико-термическая обработка (ХТО). Ее применение особенно эффективно, когда необходимо получить детали с заранее заданными свойствами. Это экономически более выгодно, чем получение объемнолегированной стали с аналогичными свойствами и как правило, может производиться на любом предприятии, имеющем термическое оборудование [1,2].

К перспективным методам ХТО относятся борирование, хромирование, силицирование, титанирование и совмещенные процессы: борохромирование, хромосилицирование, боротитанирование [3,4]. Однако, применение данных методов ХТО в промышленности тормозится их недостаточной изученностью и малой воспроизводимостью результатов в условиях производства.

Целью данной работы являлось установление механизмов диффузии бора в условиях одновременного диффузионного насыщения сталей различных классов бором, хромом и титаном. Для достижения поставленной цели необходимо определить коэффициент диффузии. Поставленная задача была решена путем определения коэффициента диффузии бора весовм методом.

**Методика эксперимента**

1. Насыщение вели на цилиндрических образцах, размеры которых (диаметр и высоту) замеряли при помощи микрометра МК 0-25 кл. 1 (ГОСТ 6507-90) с точностью ±1 мкм не менее чем в 5 точках по каждому размеру. После чего приводили к среднему размеру.

2. Массу образцов измеряли с помощью аналитических весов AND BM–252 с точностью $1 \cdot 10^{-8}$кг.

3. Содержание элементов измеряли с помощью энергодисперсионного анализатора X-MAX Pro с площадью кристалла 80 мм$^2$ и программного продукта AzTec Advanced с точностью ±0,01%. При этом анализатор дополнительно калибровали по специальным калибровочным образцам, содержащих анализируемое вещество с определенной до 3 знака точностью. В качестве калибровочных образцов использовали гексаборид лантана $LaB_6$, тетраборид углерода $B_4C$.

4. Использованные формулы для определения концентрации:

$$\chi = \frac{m_{\text{В}}}{m_{\text{общ}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где $\chi$ – массовый процент вещества, определяемый энергодисперсионным анализом;

$m_{\text{В}}$ – масса бора в исследуемом образце;

$m_{\text{общ}}$ – изменение массы образца

$$\text{C} = \frac{m_B}{m_0 V} \quad (2)$$

$m_0$ – элементарная масса одного атома бора;

$V$ – изменение объема образца, произошедшее в результате диффузии бора.

Из формул (1) и (2) можно вывести:

$$\text{C} = \frac{\chi \cdot m_{\text{общ}}}{100 \cdot m_0 \cdot V} = \frac{\chi \cdot m_{\text{общ}} \cdot N_A}{100 \cdot V \cdot M} \quad (3)$$

где $N_A$ – число Авогадро;

$M$ – молярная масса;

Диффузионное насыщение образцов проводили в оригинальных самозащитных средах, по технологическим режимам, рекомендованных в [5–7]. В каждой исследуемой партии использовали не менее трех образцов. За результат принимали среднее значение по трем образцам.

**Результаты и обсуждение**

Измеренные параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение объема и массы образцов (по трем образцам) в результате диффузионного насыщения бором совместно с другими элементами при температурах 850, 950, 1050°С*.

| Ст 3 | | | | 5ХНВМФ | | | | 12ХМ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Изменение | | | | | | | | | | | |
| Объема, м$^3$ | Массы, кг | Среднее | | Объем, м$^3$ | Масса, кг | Среднее | | Объем, м$^3$ | Масса, кг | Среднее | |
| | | $\Delta$V, м$^3$ | $\Delta$m, кг | | | $\Delta$V, м$^3$ | $\Delta$m, кг | | | $\Delta$V, м$^3$ | $\Delta$m, кг |
| 850°С | | | | | | | | | | | |
| $2{,}364 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}355 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}361 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}355 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}564 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}304 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}563 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}303 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}305 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}185 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}308 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}187 \cdot 10^{-5}$ |
| $2{,}359 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}354 \cdot 10^{-5}$ | | | $2{,}565 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}302 \cdot 10^{-5}$ | | | $2{,}311 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}188 \cdot 10^{-5}$ | | |
| $2{,}360 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}357 \cdot 10^{-5}$ | | | $2{,}561 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}304 \cdot 10^{-5}$ | | | $2{,}309 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}187 \cdot 10^{-5}$ | | |
| 950°С | | | | | | | | | | | |
| $2{,}594 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}979 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}592 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}981 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}763 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}545 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}766 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}548 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}531 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}296 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}536 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}296 \cdot 10^{-5}$ |
| $2{,}589 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}983 \cdot 10^{-5}$ | | | $2{,}768 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}547 \cdot 10^{-5}$ | | | $2{,}238 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}294 \cdot 10^{-5}$ | | |
| $2{,}593 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}980 \cdot 10^{-5}$ | | | $2{,}767 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}551 \cdot 10^{-5}$ | | | $2{,}538 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}298 \cdot 10^{-5}$ | | |
| 1050°С | | | | | | | | | | | |
| $2{,}811 \cdot 10^{-6}$ | $2{,}327 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}814 \cdot 10^{-6}$ | $2{,}325 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}944 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}895 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}947 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}893 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}759 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}468 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}762 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}467 \cdot 10^{-5}$ |
| $2{,}814 \cdot 10^{-6}$ | $2{,}325 \cdot 10^{-5}$ | | | $2{,}947 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}893 \cdot 10^{-5}$ | | | $2{,}763 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}463 \cdot 10^{-5}$ | | |
| $2{,}816 \cdot 10^{-6}$ | $2{,}323 \cdot 10^{-5}$ | | | $2{,}949 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}892 \cdot 10^{-5}$ | | | $2{,}763 \cdot 10^{-6}$ | $1{,}469 \cdot 10^{-5}$ | | |

*В таблице приведены прирост массы и размеров по каждому образцу. Размер партии составлял три образца. Измерение каждой величины на каждом образце проводили не менее 5 раз.

Как видно из таблицы 1, изменение массы образцов зависит от марки насыщаемой стали и температуры процесса насыщения. В общем случае прирост массы – это характеристика количества продиффундировавшего в сталь вещества. Тогда как изменение объема в результате диффузии такой четкой зависимости не дает, так как кроме диффузии в изменение линейных характеристик образцов существенный вклад вносят фазовые превращения.

В качестве расчетной схемы использовали схему диффузии из постоянного источника, так как диффузионно-активные атомы бора генерируются насыщающей средой в течение всего процесса насыщения в достаточном количестве. Данная расчетная схема является частным случаем решения второго закона Фика при следующих условиях:

$$\begin{cases} ?(x,\tau) = ?_0 \text{ при } x = 0 \text{ и } \forall\, \tau, \\ ?(x,\tau) = 0 \text{ при } x > 0 \text{ и } \tau = 0, \text{ x – координата,} \\ ?(x,\tau) = ? \text{ при } x > 0 \text{ и } \tau > 0 \end{cases}$$

$\tau$ – время

Решением уравнения $\frac{\partial C}{\partial \tau} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ в этом случае будет $\operatorname{erf} y = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-\tau^2} d\tau$.

Решая данное выражение, получим (таблица 2):

Таблица 2 – Результаты расчетов коэффициента диффузии D бора при образовании слоя боридов на стали Ст 3 в процессе комплексного насыщения бором, хромом и титаном.

| Расстояние от поверхности, $\cdot 10^{-6}$м | $erfc\ y$ | $erf\ y$ | $y = \frac{x}{2\sqrt{D\tau}}$, | $\tau$, с | $D$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.895541401 | 0.104458598726 | 0.0928400726 | 9000 | 2.527E-10 |
| 20 | 0.883357041 | 0.116642959 | 0.1037431151 | 9000 | 2.323E-10 |
| 40 | 0.766714083 | 0.233285917 | 0.2097814255 | 9000 | 6.463E-11 |
| 60 | 0.650071124 | 0.349928876 | 0.3207884566 | 9000 | 3.120E-11 |
| 80 | 0.533428165 | 0.466571835 | 0.4403729702 | 9000 | 1.856E-11 |
| 100 | 0.416785206 | 0.583214794 | 0.5741786242 | 9000 | 1.217E-11 |
| 120 | 0.300142248 | 0.699857752 | 0.7326534132 | 9000 | 8.280E-12 |
| 140 | 0.209103841 | 0.790896159 | 0.8881497737 | 9000 | 6.212E-12 |
| 160 | 0.142247511 | 0.857752489 | 1.0376598968 | 9000 | 4.995E-12 |
| 180 | 0.102418208 | 0.897581792 | 1.1548761644 | 9000 | 4.407E-12 |
| 200 | 0.081081081 | 0.918918919 | 1.2335106865 | 9000 | 4.206E-12 |
| 220 | 0.075391181 | 0.924608819 | 1.2572904278 | 9000 | 4.393E-12 |
| 240 | 0.065433855 | 0.934566145 | 1.3026903678 | 9000 | 4.426E-12 |
| 260 | 0.056899004 | 0.943100996 | 1.3463920164 | 9000 | 4.468E-12 |
| 280 | 0.048364154 | 0.951635846 | 1.3959381849 | 9000 | 4.470E-12 |
| 300 | 0.036984353 | 0.963015647 | 1.4749800213 | 9000 | 4.295E-12 |

**Выводы**

1. Энергия активации диффузии, рассчитанная «полуэмпирическим» путем по соотношению $Q = \frac{RT_1T_2}{T_2 - T_1}\ln\frac{D_1}{D_2}$ Q=59,9 кДж/моль. Изменение энергии активации диффузии в зависимости от температуры процесса растет со средней скоростью 3,63 кДж на каждые 10°С повышения температуры. Само явление повышения скорости активации диффузии при одновременном многокомпонентном насыщении бором, хромом и титаном имеет сложное объяснение:

– с ростом температуры происходит рост «конкуренции» диффундирующих совместно с бором атомов хрома и титана, так как подвижность этих атомов растет с повышением температуры;

– с ростом температуры снижается роль экзотермических реакций и происходит смещение равновесия в сторону эндотермических, косвенно приводящих к повышению энергии активации диффузии.

2. Судя по коэффициенту диффузии, приведенному в таблице 2, преобладающий механизм – диффузия по границам зерен и субзерен.

**Список литературы:**

1. *Ворошнин Л.Г.* Многокомпонентные диффузионные покрытия. – Минск: Наука и техника, 1981. – 296с.

2. *Гурьев А. М.*, *Хараев Ю. П.* Теория и практика получения литого инструмента. Барнаул: Россия, 2005, 222с.

3. *Гурьев А.М.*, *Иванов С.Г., Гармаева И.А.* Диффузионные покрытия сталей и сплавов. Барнаул, 2013. – 221с.

4. *Гурьев А.М.*, *Лыгденов Б.Д., Попова Н.А., Козлов Э.В.* Физические основы химико-термоциклической обработки сталей. Барнаул, ООО «НИЦ «Системы управления». 2008. – 250с.

5. *Гурьев А.М.*, *Иванов С.Г., Лыгденов Б.Д., Земляков С.А., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А.* Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей патент на изобретение RUS 2345175 03.04.2007

6. *Гурьев А.М.*, *Иванов С.Г., Земляков С.А., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А.* Способ упрочнения деталей из штамповых сталей патент на изобретение RUS 2360031 18.07.2007

7. *Гурьев А.М.*, *Иванов С.Г., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А., Лыгденов Б.Д.* Способ упрочнения стальных деталей патент на изобретение RUS 2381299 12.05.2008

8. *Гурьев М.А.*, *Иванов С.Г., Кошелева Е.А., Иванов А.Г., Грешилов А.Д., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Околович Г.А.* Комплексное диффузионное упрочнение тяжелонагруженных деталей машин и инструмента. Ползуновский вестник. 2010. № 1. С. 114-121

9. *Иванов С.Г.*, *Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Власова О.А., Гурьев М.А.* Комплексное насыщение сталей бором и хромом – борохромирование Ползуновский альманах. 2008. № 3. С. 53.

10. *Иванов С.Г.*, *Гармаева И.А., Андросов А.П., Зобнев В.В., Гурьев А.М., Марков В.А.* Фазовые превращения и структура комплексных боридных покрытий Ползуновский вестник. 2012. № 1-1. С. 106-108.

11. *Лыгденов Б.Д.*, *Гурьев А.М., Гармаева И.А., Мижитов А.Ц., Мосоров В.И.* Особенности формирования структуры диффузионного слоя и разработка технологии упрочнения литых инструментальных сталей с учетом дендритной ликвации Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2006. Т. 3. № 3. С. 84-86.

12. *Гурьев М.А.*, *Фильчаков Д.С., Гармаева И.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Околович Г.А.* Технология нанесения многокомпонентных упрочняющих покрытий на стальные детали Ползуновский вестник. 2012. № 1-1. С. 73-78.

Р*абота выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-656.2014.8.*

# STUDY OF BORON DIFFUSION WITH SIMULTANEOUS MULTICOMPONENT SATURATION CARBON AND ALLOY STEEL WITH BORON, CHROMIUM AND TITANIUM

**Ivanov S. G.,** C.Sc. (Engineering),
**Guriev M. A.,** C.Sc. (Engineering)
**Ivanova T. G.,** post graduated student,
**Guriev A. M.,** C.Sc. (Engineering)

Altay State Technical University after I.I. Polzunov, Russia, Altay region, Barnaul, Lenina St., 46, ZIP Code 656038, e-mail: serg225582@mail.ru, gurievam@mail.ru

**Abstract:** Experimentally identified the mechanism of diffusion and the coefficients of boron diffusion in the chemical-thermal treatment of carbon and alloy steels. As experimental steels were chosen steel St3, 5HNVMF, Cr12M. Determining the diffusion coefficient was carried out by the weight method. Determination of the diffusion coefficient and the activation energy was conducted by a particular solution to Fick's second law of diffusion in conditions of the infinitely powerful permanent source of diffusion. It found that: the predominant mechanism of diffusion is diffusion along grain boundaries and subgrains, the change in the activation energy of the diffusion process is depending on the temperature accounted at an average rate of 3.63 kJ in every 10 ° C

**Keywords:** chemical-thermal treatment, hardening, steel, diffusion, boriding.

**УДК 621.762.04**

# ПОЛУЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КАРБОСИЛИЦИДА ТИТАНА МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО-ИСКРОВОГО СПЕКАНИЯ

*М. Н. КАЧЕНЮК*
*О. О. АГАФОНОВА*

Каченюк М.Н. - 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
E-mail: max@pm.pstu.ru

**Аннотация:** Представлены результаты исследования уплотнения и фазообразования в механоактивированной порошковой системе на основе титана, карбида кремния и графита при различных параметрах плазменно-искрового спекания. Показано, что с увеличением температуры спекания и времени выдержки пористость снижается, а содержание карбосилицида титана увеличивается.

**Ключевые слова:** плазменно-искровое спекание, механоактивация, карбосилицид титана, фазообразование, пористость.

**Введение**

Повышение триботехнических характеристик пар трения является в настоящее время актуальной задачей, поскольку узлы трения применяются во многих отраслях промышленности. Одним из новых и перспективных функциональных материалов для изготовления деталей и изделий, подвергающихся интенсивному износу в процессе эксплуатации, является карбосилицид титана $Ti_3SiC_2$, обладающий слоистым строением и, вследствие этого, необычными полезными свойствами. Карбосилициду титана присущи свойства как керамики, так и металла. Подобно металлам он обладает отличной электро- и теплопроводностью, обрабатываемостью, высоким модулем Юнга и умеренной прочностью на изгиб, стойкостью к термоудару и высоким температурам. Также тернарный карбид дублирует некоторые свойства керамики: хорошее сопротивление окислению до 1400 °С, относительно низкую плотность (~4.52 г/см$^3$) и высокую (~1700 °С) температуру разложения. Наиболее подробно описание физико-механических и химических свойств представлены Barsoum M. W. и др. [1–5].

**Исходные материалы и методики**

Для получения композиционных материалов на основе карбосилицида титана использовали порошок титана ТПП-7 фракции менее 0,325 мм, порошок технического карбида кремния фракции менее 10 мкм, порошок углерода С-1. Механоактивацию шихты проводили в планетарной мельнице «САНД» при частоте вращения барабана мельницы от 240 мин$^{-1}$ в атмосфере вакуума ($P$ < 10 Па) на протяжении 3 часов. Соотношение масс мелющих тел и обрабатываемого материала соответствовало 7,5 : 1. Для исключения загрязнения материала при размоле использовалась оснастка, изготовленная из титана.

Плазменно-искровое спекание порошковых композиций проводилось на установке Dr. Sinter SPS-1050b в графитовой пресс-форме с обечайкой из молибденовой фольги. Температура варьировалась в пределах 1200 – 1400 °С, изотермическая выдержка - 1, 5 и 25 мин, давление составляло 30 МПа. Средняя скорость нагрева составляла 80 °С/мин.

Плотность и пористость консолидированных образцов определяли гидростатическим взвешиванием по стандартной методике [6]. Рентгенофазовый анализ синтезированных порошков и материалов на их основе проводили на дифрактометре XRD-6000 (Shimadzu) в λ-Co излучении. Расчёт содержания фаз проводили при помощи ПО «PowderCell».

Приготовление шлифов для исследования микроструктуры проводили по методике, представленной в [7]. Травление проводили в течение 2 - 5 минут универсальным водным раствором плавиковой и азотной кислоты состава 1 часть $HNO_3$, 1 часть HF, 3 части $H_2O$ [8]. Микроструктуру материалов исследовали на сканирующих электронных микроскопах Ultra-55 (Carl Zeiss) в режиме вторичных электронов. Микротвёрдость определяли на микротвердомере ПМТ-3 по стандартной методике при нагрузке 50 г.

**Результаты и обсуждение**

Для измельчения, равномерного смешивания и активации компонентов использовали механоактивацию в планетарной мельнице. Механоактивация позволяет перевести порошковую систему в высоконеравновесное состояние, что

способствует уплотнению при спекании. Шихта после механоактивации имеет средний размер частиц 4 мкм, удельную поверхность около 5 $м^2/г$ и неизменный фазовый состав (титан, карбид кремния, линии углерода сливаются с фоном).

При плазменно-искровом спекании через прессуемый материал и пресс-форму проходят импульсы постоянного тока, приводящие к разогреву оснастки. Одновременно производится двустороннее одноосевое прессование порошка за счёт приложения нагрузки одним из токоподводов.

За счёт воздействия температуры и механического давления происходит уплотнение материала (рис. 1). Пористость с 45 – 50 %, характерных для прессовки, снижается до 2 – 18 %, в зависимости от температуры спекания и высокотемпературной выдержки. При увеличении времени выдержки происходит монотонное снижение пористости материала. Снижение пористости при увеличении температуры спекания происходит только до 1300 ° С, в дальнейшем пористость практически не снижается: 5, 3 и 2 % для времени выдержки 1, 5 и 25 минут соответственно.

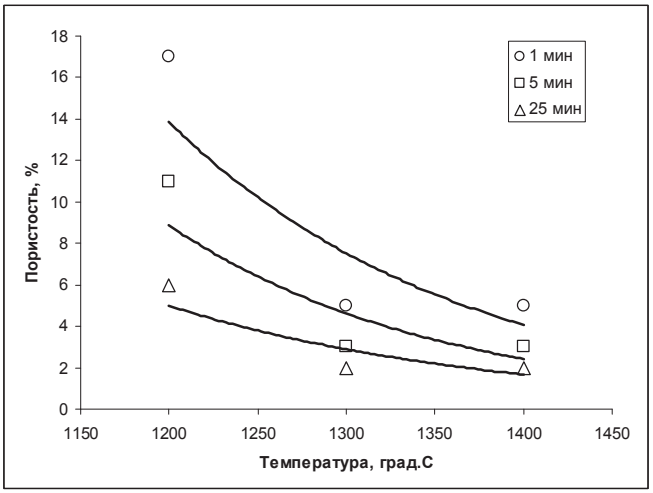



Рисунок 1 – Влияние температуры спекания и времени выдержки на пористость материала на основе карбосилицида титана.

Под воздействием высокой температуры между компонентами порошковой смеси, находящимися в высоконеравновесном состоянии, происходит взаимодействие с образованием новых фаз: карбосилицида титана, карбида титана и, иногда, силицидов титана (рис. 2).

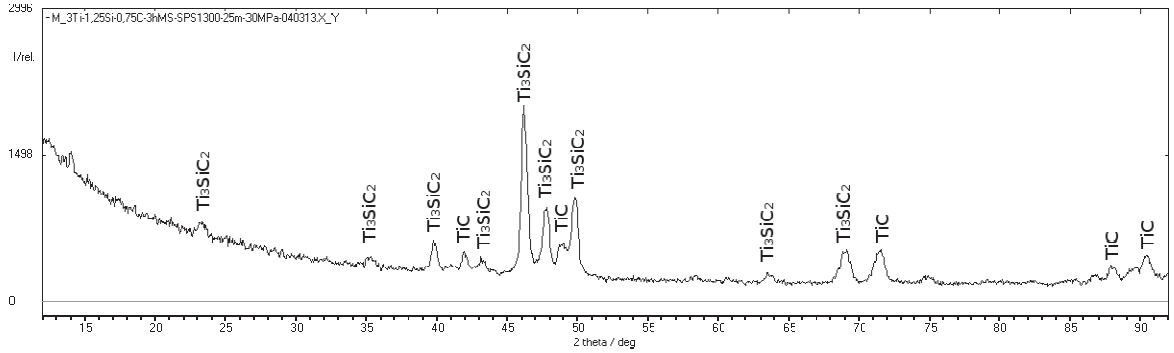



Рисунок 2 – Рентгенограмма материала, полученного при температуре ПИС 1300 ° С, выдержка 25 мин.

При температурах 1200 и 1300° С увеличение времени выдержки приводит к росту количества карбосилицида титана (рис. 3). При температуре 1400 ° С максимальным содержанием карбосилицида титана обладает материал при выдержке 1 мин, а увеличение времени выдержки несколько снижает количество $Ti_3SiC_2$.

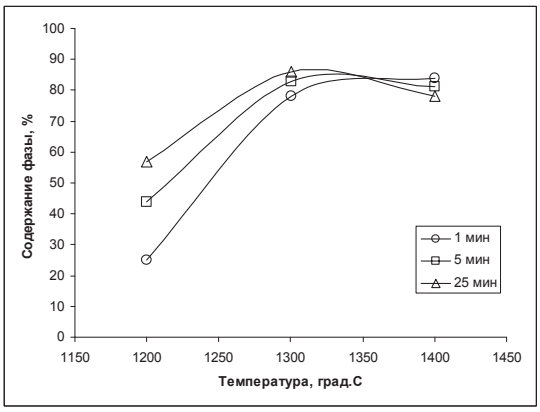



Рисунок 3 – Изменение содержания карбосилицида титана при различных температурах и выдержках ПИС.

Микротвёрдость материала изменяется от 6,3±0,9 ГПа для материала с максимальным содержанием $Ti_3SiC_2$, до 20±2,4 ГПа для материала с минимальным содержанием $Ti_3SiC_2$.

**Выводы**

1. При повышении температуры ПИС до 1300 ºС происходит интенсивный рост плотности материала. Дальнейшее повышение температуры практически не влияет на пористость. Увеличение времени выдержки также способствует снижению пористости. Наименьшая достигнутая пористость составила 2%.

2. Увеличение температуры до 1300 ºС повышает содержание фазы $Ti_3SiC_2$, дальнейшее повышение температуры до 1400 ºС при малой выдержке также приводит к росту количества карбосилицида титана. Однако продолжительная выдержка при 1400 ºС уменьшает количество $Ti_3SiC_2$.

3. Микротвёрдость изменяется от 6,3 до 20 ГПа в зависимости от содержания карбосилицида титана.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской федерации, проект №14.574.21.0065 (RFMEFI57414X0065) – «Исследования и разработка технологии получения и обработки функционального наноструктурированного износостойкого материала на основе карбосилицида титана для изделий машиностроения». Отражённые в публикации результаты представлены в части 4 отчёта о прикладных научных исследованиях.

## Список литературы

1. *Michel W. Barsoum.* The $M_{N+1}AX_N$: A new Class of Solids: Thermodynamically Stable Nanolaminates.// Prog. Solid St. Chem. V. 28. 2000, pp. 201-281.

2. *Sarkar D., Manoj Kumar B.V., Basu B.* Understanding the fretting wear of $Ti_3SiC_2$.// Journal of the European Ceramic Society. V.26, №13, 2006, pp. 2441–2452

3. *Barsoum M. W., El-Raghy T.* Synthesis and characterization of a remarkable ceramic: $Ti_3SiC_2$// Journal of the American Ceramic Society. V.79, №7, 1996, pp. 1953–1956.

4. *Barsoum M. W., El-Raghy T., Rawn C. J. et al.* Thermal properties of $Ti_3SiC_2$.// Journal of Physics and Chemistry of Solids. V.60, №4, 1999, pp. 429–439.

5. *Barsoum M. W., Brodkin D., El-Raghy T.* Formation and thermal stability of amorphous Ti-Si-C alloys.// Scripta Materialia. V.36, №5, 1997, pp. 535–541.

6. ГОСТ 2409-95. Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения.

7. *Лившиц Б.Г.* Металлография - М., 1996, 236 с.

8. *Беккерт М., Клемм Х.* Способы металлографического травления. Справочник - М.: «Металлургия», 1988 г., стр. 198, 199.

## FORMING WEAR RESISTANCE COMPOSITE MATERIAL BASED ON TITANIUM SILICON CARBIDE BY SPARK PLASMA SINTERING

**Kachenyuk M. N.,**
**Agafonova O. O.**

Kachenyuk M.N. - 614990, Perm, Komsomolskiy prospect, 29, State National Research Politechnical University of Perm, E-mail: max@pm.pstu.ru

**Abstract:** The results of research compaction and phase forming at mechanical activation powders system based on titanium, silicon carbide and graphite by various parameters of spark plasma sintering has been submitted. It is shown that with the increase of temperature and holding time the porous decreases, and titanium silicon carbide contents increases.

**Keywords:** Spark plasma sintering, mechanical activation, titanium silicon carbide, phase forming, porosity.

**УДК 621.371.392**

# РЕГУЛИРОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПУТЕМ УЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ

*А. Р. КАДОЧНИКОВА, магистр техники и технологии, преподаватель*

653033, Кемеровская область, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 32,
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске,
e-mail: anastasiyamindiyarova@mail.ru

**Аннотация**: Представлены результаты экспериментальных исследований геометрических параметров, микроструктуры и микротвердости колец подшипников качения, а также параметров сборки и общего уровня вибрации подшипников, полученные с учетом технологического наследования.

**Ключевые слова:** подшипники качения, технологическая наследственность, общий уровень вибрации, сталь ШХ15, микротвердость, микроструктура.

Подшипники являются неотъемлемой частью большинства механизмов и машин. В связи с повышением требований к надежности, долговечности и конкурентоспособности подшипников, требований экологии по защите от вредного воздействия вибрации и шума, и в связи с тем, что последние являются основными показателями качества подшипников, целью исследования является обеспечение требуемого уровня этих параметров.

Управление уровнем вибрации представляется за счет учета технологического наследования и своевременной корректировке режимов обработки на стадии изготовления подшипников.

Установлено, что основными источниками вибрации являются погрешности микрогеометрии колец и шариков.

В данной работе объектом исследования стали наружные и внутренние кольца подшипника качения 310А, изготавливаемые из стали ШХ15.

Так как на свойства готового изделия наиболее существенное влияние оказывают финишные операции, для уточнения их роли на формирование общего уровня вибрации и свойств поверхностного слоя, были сформированы две группы колец, отличающиеся режимами резания на желобошлифовальной операции.

Кольца изымались по ходу технологического процесса и подвергались исследованиям.

Установлено, что значения шероховатости дорожек качения всех колец соответствуют методам обработки и ГОСТу [1]. Анализ профилограмм желоба колец после желобополировальной операции показал, что все действительные отклонения от круглости не превысили предельные и составили 5,2 – 8 мкм, $\Delta_{пред} = 8\,мкм$ [2]. Все профилограммы характеризуются наличием малого числа волн (в большинстве случаев трех), что является неустранимой (трудноустранимой) погрешностью формы.

Для исследования микроструктуры и микротвердости стали были изготовлены образцы соответствующие ГОСТ 2999-75 [3].

Микрошлифы исследовались поперек волокон при увеличениях: ×25, ×50, ×100, ×200, ×500, ×1000, ×1600.

Анализ полученных результатов показал следующее [4, 5]:

1. Сталь в состоянии поставки имеет структуру мелкозернистого перлита со средним диаметром зерна карбида (вторичного) 1 мкм, форма включений зерна или глобули. Структура перлита в основном металле у большинства образцов оценена на 1-2 балла выше, чем в поверхностном слое. При этом 7 из 8 образцов наружных и все образцы внутренних колец превысили допустимый 4 балл.

2. Сталь после термообработки имеет структуру отпущенного мелко- и среднеигольчатого мартенсита (средняя длина иглы 6-8 мкм) с равномерно распределенными мелкими избыточными карбидами. Более половины образцов наружных и внутренних колец превысили допустимый 4 балл.

3. В стали присутствуют такие дефекты как карбидная неоднородность, микропористость, карбидная сетка. Все они имеют допустимые баллы по ГОСТ 800-78 [62]. На одном образце было зафиксировано превышение балла по структурной полосчатости. Все образцы характеризуются наличием большого числа пор, объемная доля которых составляет 1,5 – 7 %. Средний диаметр пор 50-100 мкм. Также в стали присутствует незначительное количество флокенов.

4. Средняя глубина поверхностного слоя составила 37 мкм для образцов до термообработки и 67 мкм для образцов после термообработки. Структура поверхностного слоя оценена на 1-2 балла ниже структуры основного металла и в

половине случаев для всех образцов соответствует требованиям.

Для анализа однородности структуры и определения соответствия стали требуемой твердости, были проведены исследования микротвердости по методу Виккерса.

Анализ результатов показал, что средняя величина микротвердости по образцу входит в регламентируемый интервал (HV 179-207 для образцов до ТО; HV 710-845 для образцов после ТО) у 93 % образцов. Однако колебания величины микротвердости по образцу в 54 % случаев превышает допустимые, что указывает на неоднородность структуры металла.

Данная неоднородность может быть унаследована последующими операциями и повлиять на качество готового подшипника.

Сборка подшипников осуществлялась компоновкой колец как из разных, так и из одинаковых групп, отличающихся режимами желобошлифовальной операции. Таким образом, было получено четыре группы подшипников:

• группа 1-1 - наружное кольцо из первой группы, внутреннее кольцо из первой группы;

• группа 1-2 - наружное кольцо из первой группы, внутреннее кольцо из • второй группы;

•группа 2-1- наружное кольцо из второй группы, внутреннее кольцо из первой группы;

•группа 2-2 -наружное кольцо из второй группы, внутреннее кольцо из второй группы.

На всех подшипниках были замерены: величина зазора, торцевое биение колец, радиальное биение, общий уровень вибрации, согласно методикам.

Затем было найдено среднее значение измеренных параметров по группам.

| Группа подшипников | Gr, мкм | $\Delta C_s$, мкм | $\Delta B_s$, мкм | K, мкм | W, дБ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1-1 | 10,81 | 26,36 | 8,62 | 7,55 | 56,55 |
| 1-2 | 12 | 41,2 | 8,4 | 9 | 56,71 |
| 2-1 | 10,93 | 34,6 | 12 | 6,2 | 57,26 |
| 2-2 | 11,63 | 51,9 | 9,7 | 10,8 | 56,86 |

где Gr – радиальный зазор, $\Delta C_s$ – отклонение единичной ширины наружного кольца (торцевое биение), $\Delta B_s$ – отклонение единичной ширины внутреннего кольца (торцевое биение), K – радиальное биение внутреннего кольца, W – общий уровень вибрации.

Анализ полученных результатов показал, что наибольшее влияние на общий уровень вибрации оказывает величина отклонения единичной ширины внутреннего кольца (чем больше данная величина, тем больше уровень вибрации подшипника).

Для детального представления о влиянии режимов обработки на выходные параметры подшипников были получены графики распределения параметров сборки по группам подшипников.

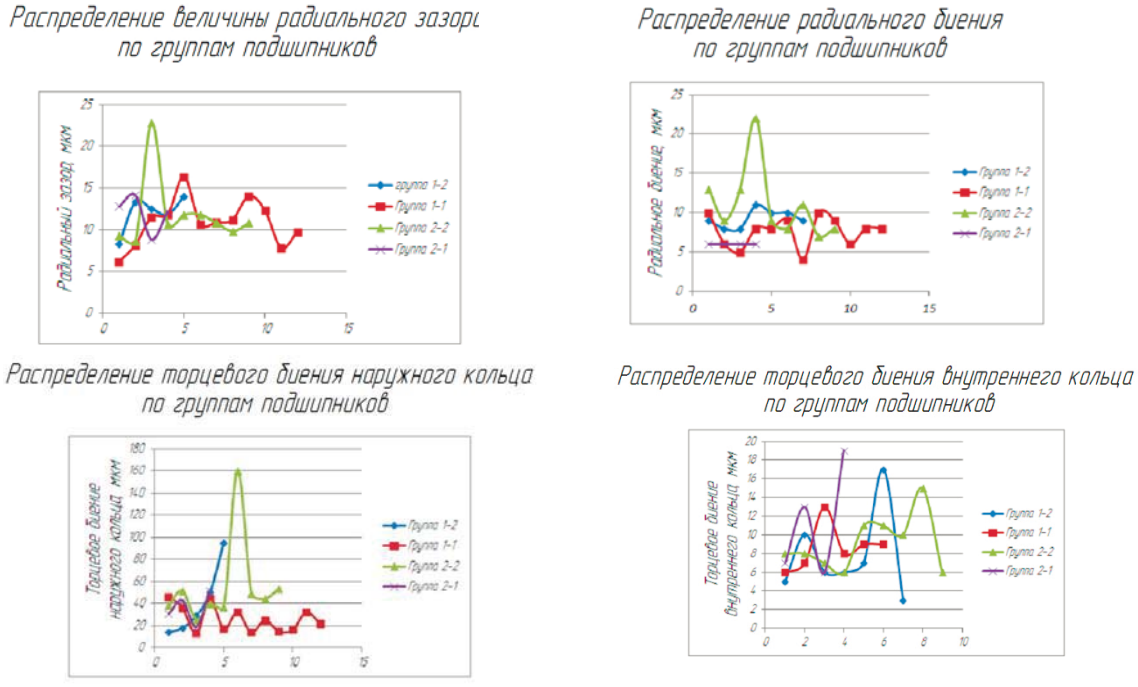



Рисунок 1 – Распределение параметров сборки по группам подшипников

Был произведен расчет предельной частоты вращения подшипника с целью определения границ исследований.

Скорость вращения с пластичной смазкой:

$d_m \times n = 4{,}5 \times 10^5$, об/мин

Скорость вращения с жидкой смазкой:

$d_m \times n = 5{,}5 \times 10^5$, об/мин

Предельная частота вращения при пластичной смазке:

$$n = \frac{(d_m \times n) \times K}{d_m} = \frac{(4{,}5 \times 10^5) \times 0{,}98}{80} = 5512{,}5 \text{ об/мин}$$

Предельная частота вращения при жидкой смазке:

$$n = \frac{(d_m \times n) \times K}{d_m} = \frac{(5{,}5 \times 10^5) \times 0{,}98}{80} = 6737{,}5 \text{ об/мин}$$

Таким образом, учет результатов измерений на частотах превышающих предельную частоту вращения подшипника является нецелесообразным.

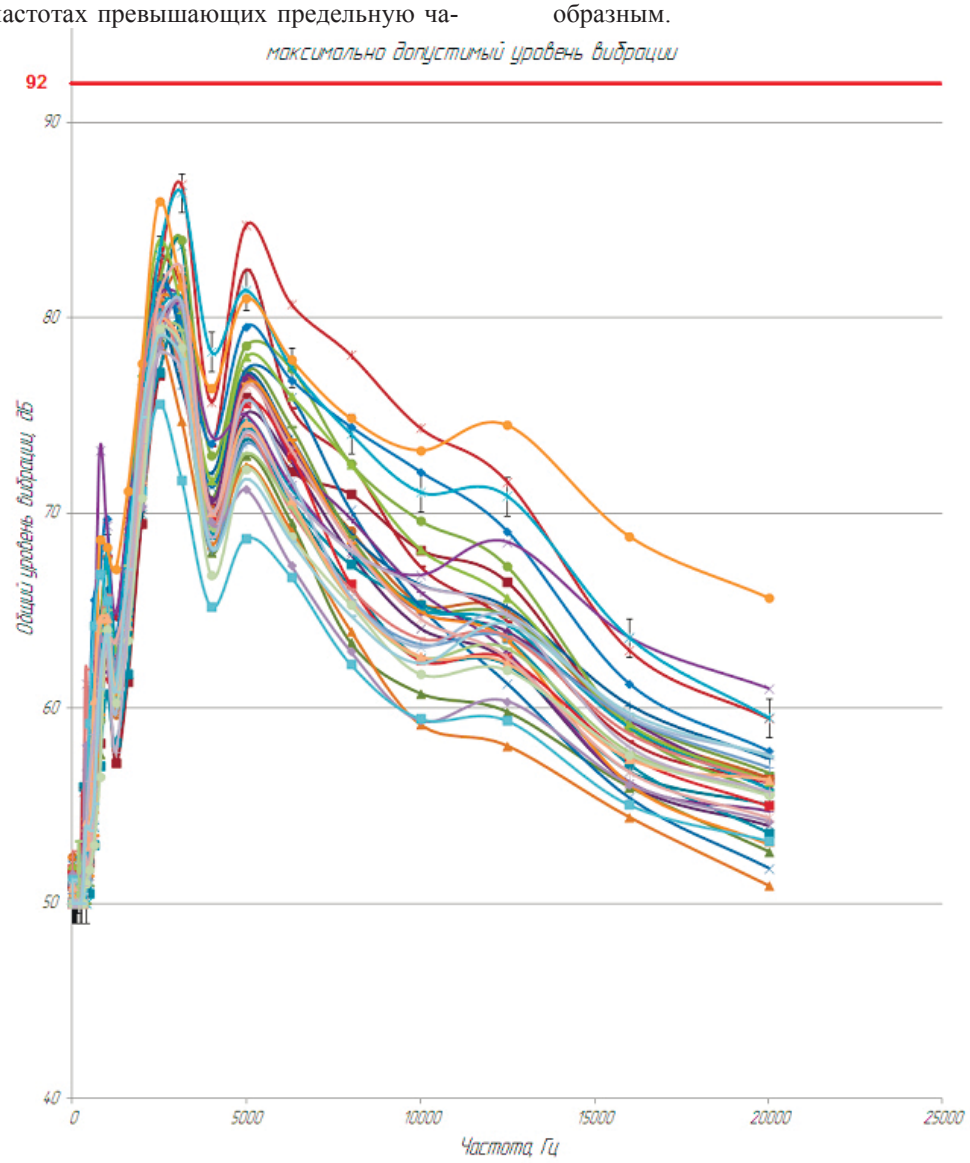



Рисунок 2 – Зависимость общего уровня вибрации от частоты

Анализ зависимости общего уровня вибрации от частоты показывает, что наибольшая величина общего уровня вибрации приходится на рабочую частоту вращения подшипника. Для выявления закономерностей влияния режимов обработки на общий уровень вибрации были получены графики зависимости общего уровня вибрации от частоты по группам подшипников.

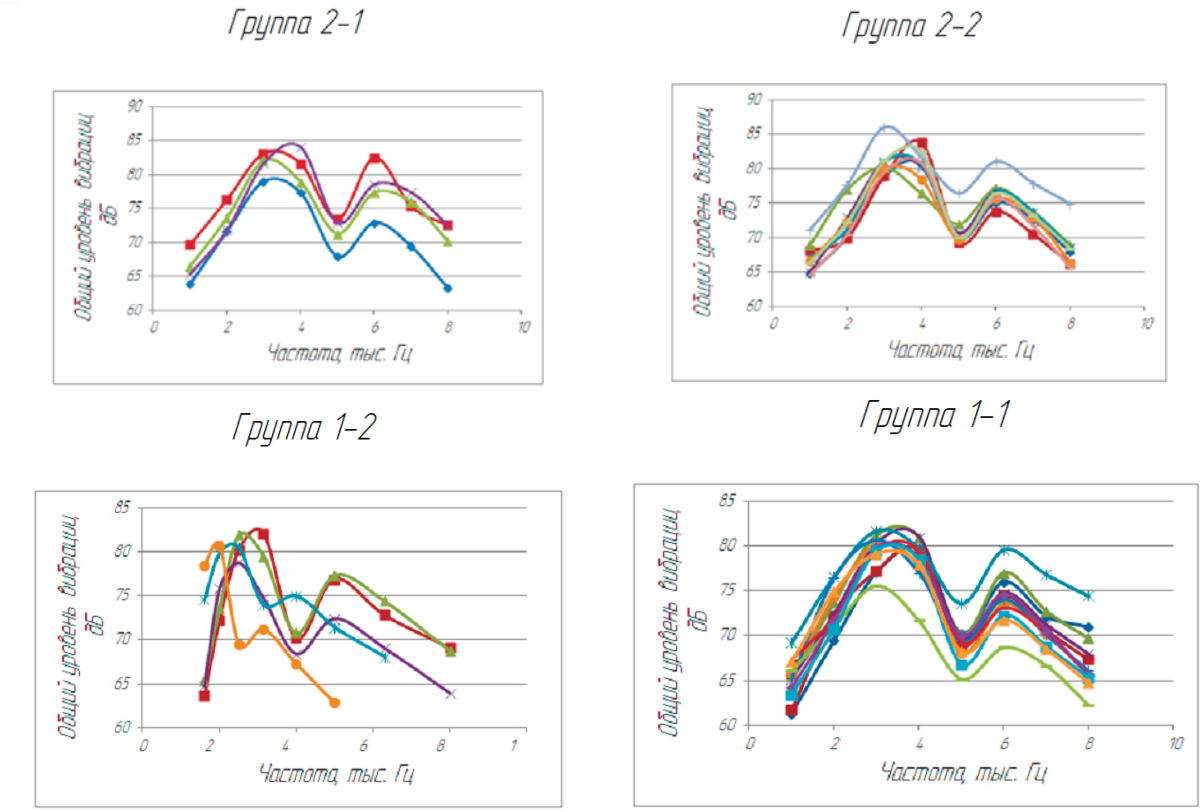



Рисунок 3 – Зависимость уровня вибрации от частоты по группам подшипников.

Анализ полученных результатов показал следующее:

1. Наибольший уровень вибрации наблюдается в группах 2-1 и 2-2 и достигает 86 дБ, что почти на 4 дБ больше, чем в группе 1-1 и 1-2.

2. Наименьший уровень вибрации показывает группа 1-1. (Следует отметить, что микроструктура стали колец из первой группы в среднем на один балл ниже по структуре мартенсита, чем из второй).

3. Наиболее неравномерное распределение уровня вибрации по частотам в группе 1-2.

Для уменьшения общего уровня вибрации необходимо сместить пики, приходящиеся на рабочую частоту подшипника в область высоких частот или снизить величину пиков управлением геометрическими параметрами подшипников, в том числе волнистостью, и структурой металла на стадии технологического процесса с учетом технологического наследования.

## Список литературы

1. ГОСТ 520-2002. «Подшипники качения. Общие технические условия». – Взамен ГОСТ 520-89; введ. 2003-07-01. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, 2004. – 72с.

2. ГОСТ 24643-81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения».

3. ГОСТ 2999-75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу».

4. ГОСТ 801-78 «Сталь подшипниковая. Технические условия».

5. ГОСТ 8233-56 «Сталь. Эталоны микроструктуры».

# REGULATION OF THE OUTPUT PARAMETERS OF ROLLING BEARINGS BY TAKING INTO ACCOUNT THE TECHNOLOGICAL INHERITANCE

**Kadochnikova A. R.,** master of engineering and technology, lecturer

653033, Kemerovo region, Prokopyevsk, street Nogradskaja, 32, Kuzbass state technical University named after T. F. Gorbachev, branch in Prokopievsk, e-mail: anastasiyamindiyarova@mail.ru

**Abstract:** Presents the results of experimental studies of the geometric parameters, microstructure and microhardness of the rings of rolling bearings, as well as build parameters and the overall level of vibration of bearings obtained taking into account the technological inheritance.

**Keywords:** bearings, technological heredity, overall vibration, steel ShKh15, microhardness, microstructure.

**УДК 658. 512: 621. 923**

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛА И ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

*М. Л. ХЕЙФЕЦ[1], д.т.н., mlk-z@mail.ru,*
*А. С. ВАСИЛЬЕВ[2], д.т.н., vas@bmstu.ru*
*С. А. КЛИМЕНКО[3], д.т.н., atmu@meta.ua*
*ЛЮБОДРАГ ТАНОВИЧ[4], д.т.н., ltanovic@mas.bg.ac.rs*
*([1]Президиум НАН Беларуси, Беларусь; [2]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва; [3]Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Украина, Киев; [4]Белградский университет, Сербия, Берград)*

**Аннотация:** Рассмотрены методы технологического управления наследованием эксплуатационных свойств деталей, включающие: измерения параметров наиболее ответственных деталей; определение механизмов технологического наследования на основе коэффициентов передачи и взаимовлияния эксплуатационных свойств; анализ технологических барьеров при интенсивных воздействиях потоками энергии, разработку мероприятий по управлению технологическими процессами.

**Ключевые слова:** наследственность, качество поверхности, технологическое управление, эксплуатационные свойства.

**Введение.** Под наследственностью в технологии машиностроения подразумевают явление переноса свойств обрабатываемого объекта от предшествующих операций и переходов к последующим, которое в дальнейшем сказывается на эксплуатационных свойствах деталей машин [1, 2]. Носителями наследственной информации являются обрабатываемый материал и поверхности детали со всем многообразием описывающих их параметров. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя через различные операции и переходы, испытывая воздействия технологических факторов [3, 4].

В технологической цепочке существуют своего рода «барьеры». Некоторые технологические факторы преодолеть эти «барьеры» не могут и в таком случае их влияние на конечные свойства объекта отсутствуют. Другие факторы такие «барьеры» проходят, но при этом значительно теряют свою исходную силу и влияют на конечные свойства очень слабо [1, 3]. Самые существенные «барьеры» проявляются на термических операциях, а также на операциях, сопровождающиеся поверхностным деформированием и упрочнением, так как они изменяют микроструктуру обрабатываемого материала, микрогеометрию формируемой поверхности, приводят к короблению детали и искажению ее формы. В ходе этих операций различные пороки поверхности, такие как структурная неоднородность, поры, микротрещины, могут развиваться или «залечиваться». Следовательно, процессом технологического наследования можно управлять, с тем, чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранить в течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно – ликвидировать в его начале [2, 4].

**Технологическая передача комплекса параметров качества.** Технологический процесс изготовления и эксплуатации деталей двигателя внутреннего сгорания может быть представлен в виде графа, выделяющего при изготовлении заготовительные, черновые операции, чистовые и отделочные операции, а так же стадии эксплуатации [2]. Граф, как правило, является ориентированным, а параметры качества взаимосвязаны между собой (рис. 1).

Начальная вершина графа, при описании технологического процесса и эксплуатации представляет собой заготовку (З). Конечная вершина – готовая деталь (Д) в процессе эксплуатации. Ориентированные ребра графа показывают передачу свойств детали при обработке и в эксплуатации. Передача ребра описывается коэффициентом наследования $K$, показывающим количественное изменение свойства и равным отношению предыдущих $S_j$ и последующих $S_{j+1}$ значений свойства [4]:

$$K = S_j/S_{j+1}.$$

Помимо прямой передачи свойств (рис. 1) при технологическом наследовании целесообразно оценивать их взаимовлияние (рис. 2). Общую структуру процессов можно представить как сложную многомерную систему, в виде последовательности изменения основных параметров качества детали [2]. На вход технологической системы поступают различные характеристики заготовки $\{S_{10}, S_{20}, ..., S_{m0}\}$, а на её выходе обеспечивается соответствующий набор тех же характеристик для готовой детали $\{S_{1p}, S_{2p}, ..., S_{mp}\}$. Эти изменения определяются действием совокупности технологических $\{t_{l1}, t_{l2}, ..., t_{ln}\}$ факторов для каждой операции $\varphi_l$ рассматриваемого процесса [3].

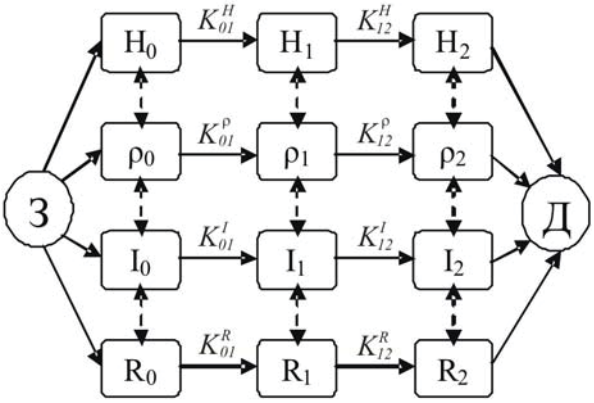



Рисунок 1 – Развернутый граф технологического наследования, учитывающий комплекс параметров качества

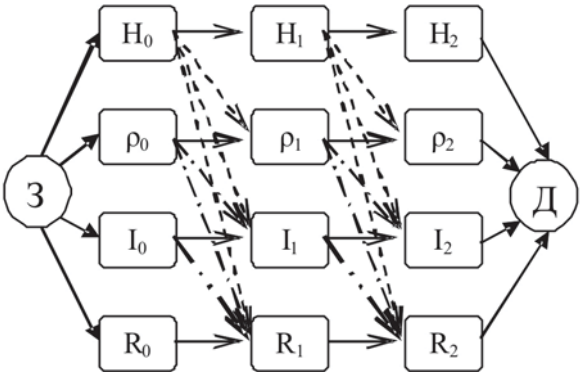



Рисунок 2 – Граф технологического наследования, отражающий взаимовлияние физико-механических и геометрических параметров качества

Так для параметра качества $S$ после окончательной обработки [2]:

$$S_p = a_p S_{p-1}^{b_p}.$$

Количественные связи наследственности, зависящие от выбора метода обработки, определяются коэффициентами $b$, а основные условия обработки внутри этого метода – коэффициентами $a$. Выполнив преобразования с уравнениями для предшествующих операций $\varphi_{p-1}$, $\varphi_{p-2}$, ..., $\varphi_1$ получают общую математическую модель изменения параметра качества для всего процесса:

$$S_p = a_p a_{p-1}^{b_p} a_{p2}^{(b_p b_{p-1})} \ldots a_1^{(b_p b_{p-1} \ldots b_2)} S_0^{(b_p b_{p-1} \ldots b_1)}$$

Коэффициент наследственности $a_l$ описывает влияние факторов $t_{l1}$, $t_{l2}$, ..., $t_{ln}$ на рассматриваемый параметр качества $S_j$ для операции $\varphi_l$ и может быть представлен [3]:

$$a_1 = k_{l0} t_{l1}^{k_{l1}} t_{l2}^{k_{l2}} \ldots t_{\ln}^{k_{\ln}}$$

где $k_{l0}$, $k_{l1}$, $k_{l2}$, .., $k_{ln}$ – эмпирические коэффициенты влияния технологических факторов.

Анализ зависимостей показывает, что весь процесс может быть выражен в виде суммы действия окончательной операции и некоторой доли влияния предшествующих операций на исходное состояние заготовки $S_0$, которые определяются коэффициентами наследственности $b_1$, $b_2$,.., $b_p$. Если на какой-либо операции $\varphi_l$ коэффициент технологической наследственности $b_l = 0$, то это означает отсутствие влияния исходного качества состояния заготовки на окончательное состояние после данной операции, что может служить интерпретацией действия на операции $\varphi_l$ непреодолимого «технологического барьера» [2, 4].

Для выявления основных наследуемых в эксплуатации показателей качества, посредствам контроля которых целесообразно управлять технологическим процессом, проводился АВС-анализ (рис. 3) изменения в процессе эксплуатации начальных геометрических параметров поверхности и физико-механических характеристик материала.

АВС-анализ показал, что в большинстве случаев, уже в период приработки (I) существенно меняется шероховатость (1) и структура поверхностного рельефа (2). Волнистость (3) и структура поверхностных слоев (4) изменяются при установившемся изнашивании (II). Точность размеров (5) и геометрическая форма поверхности (6) остаются в пределах допустимых значений даже в начале стадии катастрофического изнашивания (III). Только остаточные напряжения (7) и структура основного материала (8) могут сохраняться до полного разрушения трущихся поверхностей [5].

Поэтому для изучения наследования выбирались оперативно и наименее трудоемко контролируемые физико-механические геометрические показатели качества из начальной и конечной групп (0-С). При этом особое внимание уделялось показателям (5, 6) претерпевающим существенные изменения в начале катастрофического износа (В), связанным как с физико-механическими характеристиками материала (7, 8) так и с геометрическими параметрами рельефа поверхности (1, 3).

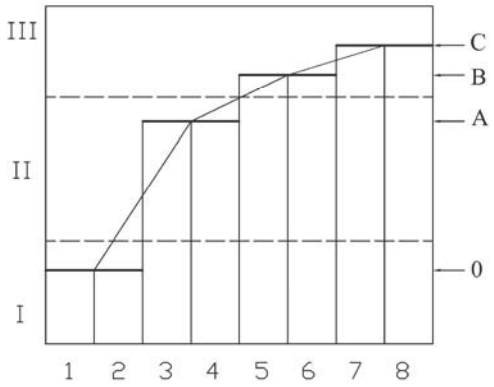



Рисунок 3 – АВС-анализ изменения в процессе эксплуатации (I-III) начальных показателей качества (1-8): 0 – формирование поверхности; А – изменение контактных нагрузок; В – выход детали из строя; С – полное разрушение поверхности; I – приработка; II – нормальное изнашивание; III – катастрофическое изнашивание; 1 – шероховатость поверхности; 2 – структура поверхностного рельефа; 3 – волнистость поверхности; 4 – структура поверхностных слоев; 5 – форма поверхности; 6 – точность размеров; 7 – остаточные напряжения; 8 – структура основного материала

**Технологические барьеры для передачи параметров качества.** Изучение последовательности воздействий концентрированными потоками энергии на операциях комбинированной обработки, а также анализ формируемых параметров качества поверхностей сопровождаются исследованием технологической наследственности образующихся диссипативных структур (рис. 4).

Исследование тепловых и механических воздействий на поверхностный слой показало, что концентрированный нагрев разупрочняет поверхностный слой за счет роста зерна и растворения упрочняющих фаз (рис. 4, *б*). Глубина фазовых превращений определяется границей распространения теплового потока. Инструмент срезает дефектный слой и упрочняет поверхность деформированием, завальцовывая трещины, поры, измельчая зерно. Проникновение механических воздействий также происходит на определенную глубину (рис. 4, *а*).

С позиций технологической наследственности, импульс энергии передается обрабатываемой поверхности, а скорость и ускорение распространения энергии отражаются на всех участках прохождения импульса.

О скорости распространения можно судить по распределению значений упрочнения по глубине поверхностного слоя (рис. 4, кривые 1). Величина энергии импульса определяется площадью, расположенной под кривой упрочнения, которую можно определить графическим интегрированием (рис. 4, кривые 2). Ускорение при прохождении импульса, т.е. первая производную от скорости или вторая от энергии импульса, определяется графическим дифференцированием кривой упрочнения (рис. 4, кривые 3). Результаты дифференцирования описывают глубину проникновения импульса, следовательно, вторую производную от импульса энергии, характеризующую величину и положение силы, тормозящей поток энергии в поверхностном слое, можно рассматривать как технологический барьер.

Изучение технологических барьеров показывает, что они достаточно точно описываются нормальным законом распределения с различными величинами дисперсий. При упрочнении и разупрочнении барьеры располагаются по разные стороны от оси координат (рис. 4, кривые 3).

При достаточной близости технологических барьеров в результате нагрева увеличивается пластичность поверхностного слоя и деформации проникают на большую глубину. Увеличение зоны и степени деформации, сопровождающееся усилением поглощения тепла, препятствует прохождению и приближает границу распространения теплового потока к поверхности. В результате совместное действие механических и тепловых потоков приводит к совмещению технологических барьеров и по всей глубине воздействия происходят термомеханические процессы (рис. 4, *в*).

**Заключение.** Технологическое наследование эксплуатационных свойств в процессах изготовления деталей целесообразно описывать графом, отражающим коэффициенты передачи и взаимовлияния физико-механических и геометрических параметров.

Для расчета коэффициентов наследования по степени значимости влияния установлена последовательность физико-механических и геометрических параметров качеста детали.

Вторую производную от импульса энергии, характеризующую величину и положение силы, тормозящей поток энергии в поверхностном слое, следует рассматривать как технологический или эксплуатационный барьер.

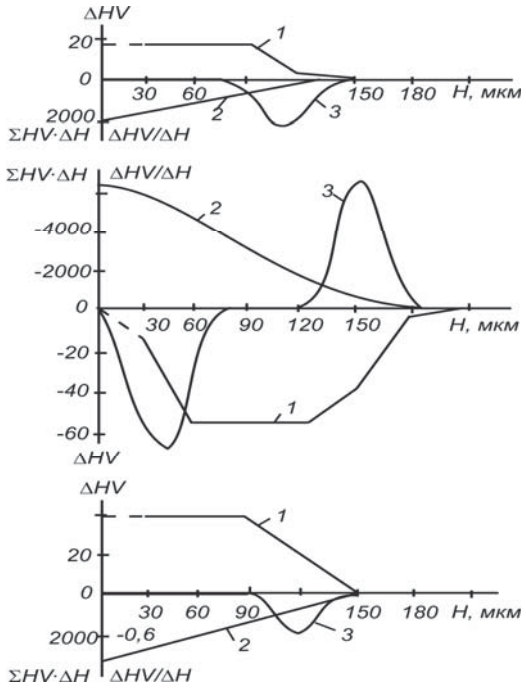



Рисунок 4 – Зависимости распределения по глубине поверхностного слоя материала: *1*– изменения твердости ΔHV; *2* – общего упрочнения ΣHVΔH; *3* – скорости приращения упрочнения ΔHV/ΔH; после резания с нагревом недостаточной (*а*), избыточной (*б*) и рациональной (*в*) интенсивности

## Список литературы

1. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П. И. Ящерицын [и др.]. – Новополоцк: ПГУ, 1996. – 136с.

2. Технологические основы управления качеством машин / А. С. Васильев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 256с.

3. *Ящерицын, П. И.* Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. –256с.

4. *Дальский, А. М.* Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 223с.

5. *Ящерицын, П. И.* Работоспособность узлов трения машин / П. И. Ящерицын, Ю. В. Скорынин. – Минск: Наука и техника, 1984. – 288с.

# TECHNOLOGICAL INHERITANCE OF QUALITY PARAMETERS OF THE MATERIAL AND THE WORK PIECE SURFACE

**Kheifetz M. L.**[1], Dr.Sc., Professor,
**Vasilyev A. S.**[2], Dr.Sc., Professor,
**Klimenko S. A.**[3], Dr.Sc., Professor,
**Lubodrag Tanović**[4], Dr.Sc., Professor.

[1]Department of Physics and Technical Sciences of NASB, Minsk, Belarus
[2]N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
[3]V.N. Bakul Institute for Superhard Materials NASU, Kiev, Ukraine
[4]University of Belgrade, Belgrade, Serbia

**Abstract:** To describe the technological inheritance of operational properties in the processes of the parts manufacturing by a graph reflecting the transfer coefficients and interaction of physical and- mechanical and geometrical parameters is proposed The methods of process control of the parts operational properties inheritance including: measurement of parameters, the most critical parts; identifying of mechanisms of technological inheritance based on the coefficients of transmission and interaction of the performance properties are consid-

ered; analysis of technological barriers at the impact of intensive energy flows, development of measures for technological process control were also considered.

**Keywords:** technological inheritance, physical and mechanical parameters of the material quality, the geometric characteristics of the surface.

**УДК 621. 923: 658. 512**

# СТРУЖКООБРАЗОВАНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

*М. Л. ХЕЙФЕЦ, доктор техн. наук*

Президиум НАН Беларуси, Беларусь, Минск, пр-т Независимости, 66,
mlk-z@mail.ru

**Аннотация:** Предложена модель напряженного состояния технологической среды при лезвийной обработке. Проведен анализ кинетики структурообразования в инструментальном и обрабатываемом материалах. Исследованы теплофизические процессы применения лезвийных инструментов в металлообработке. Показано, что стружкообразование и формирование поверхности при лезвийной обработке характеризуется цикличностью состояний структур поверхностного слоя. Предложено структурообразование в технологической среде описывать переходом объемной вязкости в динамическую через ротационную. Изучены взаимосвязи процессов стружкообразования с изнашиванием и разрушением инструментов и даны технологические рекомендации.

**Ключевые слова:** лезвийная обработка, стружкообразование, формирование поверхности, инструмент.

**Введение.** Для исследования условий рационального применения инструментов, свойств формирующегося поверхностного слоя обрабатываемого изделия, представляющего собой в процессе обработки хрупкую, упругую, пластичную, вязкую или другую среду, необходимо описать состояния инструментального и обрабатываемого материала параметрами [1], которые при значительных изменениях внешних воздействий отражают фазовые переходы [2].

**Моделирование напряженного состояния технологической среды при обработке**. Движения потоков вещества в объеме технологической среды сопровождаются явлением внутреннего трения. Динамические касательные $\tau_Д$ и нормальные $\sigma_Д$ напряжения внутреннего трения в движущейся среде описываются формулой Ньютона [1]:

$$\tau_Д = -(\nu\rho)\sigma_Д grad\vec{\upsilon} \qquad (1)$$

и характеризуются первой (или динамической) вязкостью

$$\eta = \nu\rho ,$$

где $\nu$ – кинематическая вязкость; $\rho$ – плотность среды; $grad\vec{\upsilon} = d\vec{\upsilon}/d\vec{n}$ – градиент скорости движения слоев среды $\vec{\upsilon}$ в направлении внутренней нормали $\vec{n}$ к поверхности слоя.

При сжатии или растяжении среды наряду с $\sigma_Д$ в направлении $\vec{n}$ возникают нормальные напряжения $\sigma_0$, вызываемые динамическим трением [1]:

$$\sigma_0 = -(\varsigma/\rho)d\rho/d\sigma_Д = -\varsigma div\vec{\upsilon} , \qquad (2)$$

которые описываются второй (или объемной) вязкостью $\varsigma$.

Устойчивость состояний технологической среды [2] описывается уравнением баланса во времени $\tau$ локальной плотности энтропии $\rho\varepsilon$ [3, 4]:

$$d(\rho\varepsilon)/dt + div(\rho\varepsilon\vec{\upsilon}) + div\vec{F}_\varepsilon = \sigma , \qquad (3)$$

где $\vec{F}_\varepsilon$ – плотность потока энтропии $\varepsilon$; $\sigma = d\varepsilon/d\tau$ – производство энтропии.

Исходя из того, что

$$\vec{\upsilon} = rot\vec{\upsilon}^* , \qquad (4)$$

где $\vec{\upsilon}^*$ – составляющая вращения в потоках среды, движущихся со скоростью $\vec{\upsilon}$ (4), является решением уравнения (3), можно для описания состояний среды предложить третью (или ротационную) вязкость [2]:

$$\mu = 1/\nu^* ,$$

где $\nu^* = (\sigma_z/\sigma_{yz})(\upsilon/S)$, в которой $(\sigma_z/\sigma_{yz})$ – соотношение трансляционной и ротационной составляющих напряженного состояния среды [5]; $(\upsilon/S)$ – соотношение главного и дополнительного движений обрабатываемых изделий. Тогда добавочные касательные напряжения $\tau_0$ будут представлены формулой:

$$\tau_0 = -(1/\nu^*)rot\vec{\upsilon}^* = -\mu rot\vec{\upsilon}^* . \qquad (5)$$

Рассмотрим, согласно параметрам напряженного состояния технологической среды (1), (2) и (5), кинетику процессов изнашивания инструментов, стружкообразования и формирования свойств поверхностного слоя при возрастании скоростей главного $\upsilon$ и дополнительного $S$ движений обработки или увеличении мощности воздействий концентрированными источниками энергии (рис.1,2 и табл.1).

**Стружкообразование и формирование поверхности в процессах обработки.** В процессе обработки на малой скорости при образовании опережающей хрупкой трещины скольжения

(рис. 1, I; рис. 2, I и табл. 1, I) состояние зоны формообразования определяется давлением на технологическую среду в направлении главного движения υ сжимающим напряжением $\sigma_z$, пропорциональным объемной вязкости ς. Если $\sigma_z$ превышает критическое значение, то происходит разрушение берегов трещины, а образующиеся частицы раскалываются на более мелкие [6].

В том случае, когда частицы разрушения не имеют возможности вращаться (рис. 1, II; рис. 2, II и табл. 1, II), они повышают составляющую трения скольжения $\tau_{yz}$ между берегами трещины и компактируются скоплениями или элементами формирующейся суставчатой стружки при резании. Такая структура описывается соотношением ($\tau_{yz}/\sigma_z$), в котором $\tau_{yz}$ определяется в направлении геометрической суммы векторов главного движения и перемещений компактирующихся скоплений [6].

В процессе наростообразования (рис. 1, III и рис. 2, III; табл. 1, III) формирование вихревых диссипативных структур характеризуется соотношением ($\sigma_{yz}/\sigma_z$) [2], в котором $\sigma_{yz}$ – ротационная, а $\sigma_z$ – трансляционная составляющие напряженного состояния термодеформационного процесса. При этом ротационная составляющая $\sigma_{yz} = \sigma_y \cdot \sigma_z$ определяется в направлении вектора момента формообразования поверхности [2].

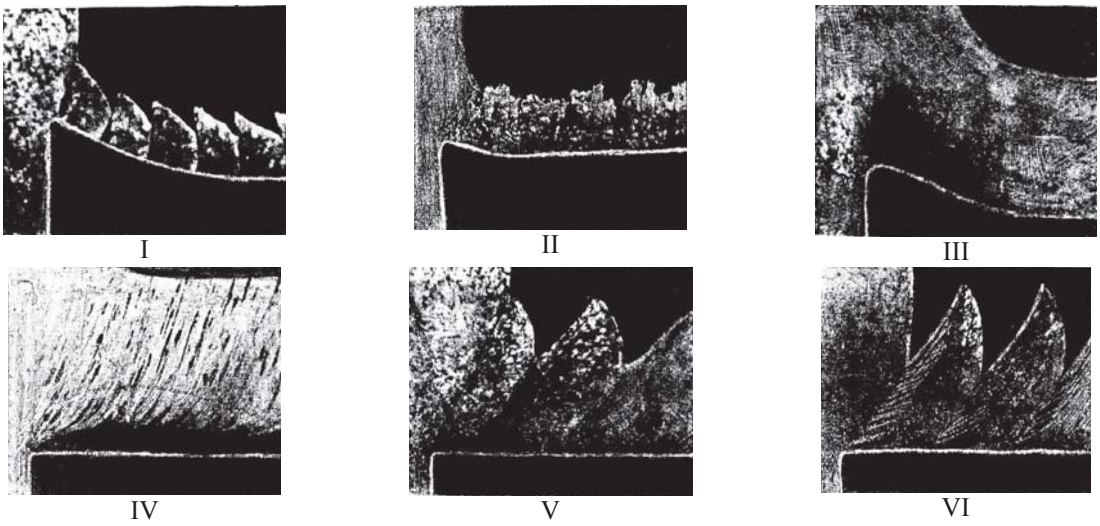



Рисунок 1 – Стружкообразование в процессах лезвийной обработки: I – элементной стружки; II – суставчатой стружки; III – при наростообразовании; IV – сливной стружки; V и VI – ступенчатой стружки

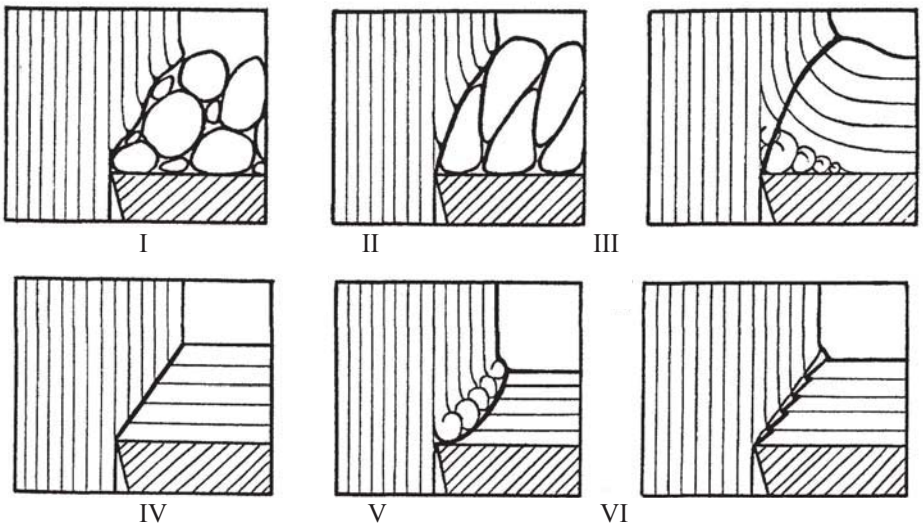
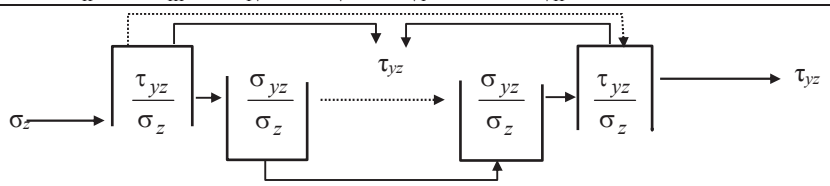



Рисунок 2 – Схемы этапов структурообразования в процессах формирования поверхности: I – хрупкое разрушение материала опережающей трещиной; II – компактирование частиц разрушения; III – вихревое образование застойных структур; IV – пластическое течение материала; V – волновое образование складок; VI – расслоение материала адиабатическими сдвигами

Таблица 1 – Изменения составляющих напряженного состояния материала, описывающих вязкость, при увеличении скорости обработки лезвийным инструментом

| Стадии | I | II | III | IV | V | VI | VII |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Скорость | $\upsilon_I < \upsilon_{II} < \upsilon_{III} < \upsilon_{IV} < \upsilon_V < \upsilon_{VI} < \upsilon_{VII}$ | | | | | | |
| Напряжен-ное состояние |  | | | | | | |
| Вязкость | Объемная,ς | Ротационная, μ | | | | | Динамическая,η |

Пластическое течение поверхностных слоев обрабатываемого материала или формирование сливной стружки в процессе резания (рис. 1, IV; рис. 2, IV и табл. 1, IV) описывается составляющей сдвига $\tau_{yz}$, характеризующей напряженное состояние вблизи условной плоскости сдвига [7].

Образование вихреподобных уплотненных структур, следующих за условной плоскостью сдвига (рис. 1, V; рис. 2, V и табл. 1, V), вновь определяется соотношением ($\sigma_{yz}/\sigma_z$) ротационной и трансляционной составляющих термодеформационного процесса [2].

При циклических адиабатических сдвигах или формировании ступенчатой стружки в процессе резания (рис. 1, VI; рис. 2, VI и табл. 1, VI) напряженное состояние описывается аналогично суставчатому стружкообразованию ($\tau_{yz}/\sigma_z$) составляющими термопластического сдвига $\tau_{yz}$ и сжатия $\sigma_z$ [8].

Образование жидкой фазы между контактирующими поверхностями (табл. 6, VII) характеризуется течением расплава материала с динамической вязкостью η пропорциональной касательным напряжениям $\tau_{yz}$ между условными слоями жидкости [8].

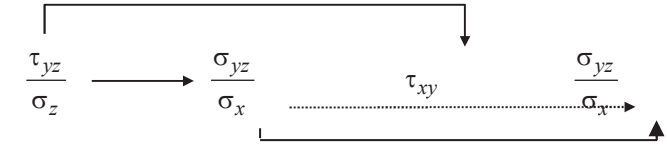
Проанализируем результаты изучения процессов стружкообразования и формирования свойств поверхностного слоя обрабатываемого изделия (см. табл. 1).

Таким образом, кинетика процессов стружкообразования и формирования эксплуатационных свойств изделий при обработке инструментами характеризуется цикличностью состояний структур поверхностного слоя (см. табл. 1). При этом структурообразование в технологической среде описывается переходом объемной вязкости ς (7) в динамическую η (6) через ротационную μ (10) со снижением числа степеней свободы термодинамической системы.

Учет циклических особенностей и свойств среды при переходе из одного состояния в другое в процессах стружкообразования и формирования структур поверхностного слоя позволяет рациональным образом выбрать инструменты для проектируемых методов обработки.

**Взаимосвязь стружкообразования с изнашиванием и разрушением инструментов.** Изучение процессов структурообразования при обработке инструментом с нагревом срезаемого слоя позволяет отметить, что с ростом интенсивности плазменного электродугового нагрева, вместе с изменением процессов стружкообразования происходит смена видов изнашивания и разрушения инструмента, формирующего обрабатываемую поверхность (табл. 2) [2].

Таблица 2 – Изменения составляющих напряженного состояния, описывающих изнашивание и разрушение инструмента при увеличении интенсивности дополнительного нагрева

| Стадии | I | II | III | IV |
|---|---|---|---|---|
| Интенсивность нагрева | $I_I < I_{II} < I_{III} < I_{IV}$ | | | |
| Напряженное состояние |  | | | |
| Обрабатываемый материал | Хромони-келевые по-рошко-вые наплавки | Наплавки сталь-ными легирован-ными проволока-ми | Высоко-прочные наплавки порош-ками, проволока-ми | Жаропро-чные хромо-ни-келевые сплавы |
| Толщина срезаемого слоя, мм | до 0,2 | до 0,4 | до 0,3 | до 0,5 |
| Сила тока электричес-кой плазменной дуги, А | 40…60 | 30…50 | 80…100 | 100…120 |
| Виды изнашивания | Механо-тер- | Термо-усталостное | Механическое | Усталост-ное |

| | мическое | | | цикли-ческое |
|---|---|---|---|---|
| Допустимая величина износа, мм | 0,1…0,2 | 0,3…0,4 | 0,5…0,7 | 0,8…1,0 |
| Разрушение | Смятие, сколы | Трещины, выкраши-вания | Сколы (при потере проч-ности) | Трещины, выкраши-вания |

При низкой интенсивности нагрева механотермическое изнашивание (табл. 2, I) в процессе приработки под воздействием давления $\sigma_z$ приводит к сколам вдоль линии касательных напряжений $\tau_{yz}$.

Дальнейшее изнашивание носит термоусталостный характер (табл. 2, II), а термоциклические напряжения $\sigma_x$ создают трещины, по которым происходит выкрашивание в результате воздействия ротационной составляющей напряженного состояния $\sigma_{yz}$.

Повышение интенсивности нагрева до рациональных значений обеспечивает длительное механическое изнашивание (табл. 2, III), а разрушение наступает только при потере прочности лезвием, путем сколов по линии скольжения $\tau_{yz}$.

При обработке вязких материалов наблюдается циклическая усталость (табл. 2, IV), сопровождающаяся растрескиванием от циклических напряжений $\sigma_x$ и выкрашиванием с вращением фрагментов инструментального материала под действием $\sigma_{yz}$.

Анализ видов стружкообразования (см. табл. 1) и изнашивания инструментов из сверхтвердых материалов (см. табл. 2) позволил рекомендовать использование дополнительного плазменного электродугового нагрева при обработке высокопрочных материалов и покрытий твердостью свыше 50 HRC.

Рассмотренные стадии кинетики изнашивания и разрушения инструмента I – II – III – IV (см. табл. 2) аналогичны стадиям структурообразования II – III – IV – V (см. табл. 1) при формировании стружки. Отсутствие I, VI и VII стадий свидетельствует о более узком диапазоне изменения свойств инструментальных материалов по сравнению с обрабатываемым под воздействием концентрированных потоков энергии.

**Заключение.** Состояние инструментального и обрабатываемого материала необходимо описывать параметрами, которые при значительных изменениях внешних воздействий отражают фазовые переходы при структурообразовании в поверхностных слоях. Кинетика процессов стружкообразования и формирования поверхности при лезвийной обработке характеризуется цикличностью состояний структур поверхностного слоя. Структурообразование в технологической среде инструментального и обрабатываемого материала описывается переходом объемной вязкости среды в динамическую через ротационную.

## Список литературы

1. Теоретические основы теплотехники / Под ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.

2. *Хейфец, М.Л.* Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.

3. *Гленсдорф, П.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации / П. Гленсдорф, И. Пригожин. – М: Мир, 1973. – 280 с.

4. *Эбелинг, В.* Образование структур при необратимых процессах / В.Эбелинг. – М.: Мир, 1979. – 279 с.

5. *Лихачев, В.А.* Введение в теорию дисклинаций / В.А.Лихачев, Ю.Р.Хайров. – Л.: ЛГУ, 1975. – 183 с.

6. *Алексеев, Н.М.* О самоподобии процессов трения и изнашивания на различных масштабных уровнях / Н.М. Алексеев [и др.] // Трение и износ. – 1992. – Т.13, № 1. – С. 161 – 171.

7. *Силин, С.С.* Метод подобия при резании металлов / С.С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.

8. *Клименко, С.А.* Режущий инструмент из ПСТМ на основе нитрида бора / С.А. Клименко, Ю.А. Муковоз, Л.Г. Полонский. – Киев: Знание, 1994. – 36 с.

# CHIP FORMATION AND FORMATION OF SURFACE LAYER AT THE EDGE CUTTING MACHINING

**Kheifetz M. L.**, Dr.Sc., Professor

Department of Physics and Technical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**Abstract:** A model of the stress state of the technological environment during processing by using of the edge cutting machining has been proposed. The kinetics of structure formation in the tool and processed materials is analyzed. Thermophysical processes of the edge cutting machining tools using at the metal treatment were investigated. It is shown that the chip formation and the formation of surface in case of material processing by the using edge cutting machining are characterized by cyclic structures of the surface layer. It is proposed to describe the structure formation in the technological environment through transition of the volumetric viscosity to the dynamic viscosity with an intermediate transition through the rotary viscosity. The relationships of processes of chip formation and wear and destruction of tools were studied and technological advice are given.

**Keywords**: edge cutting machining, chip formation, formation of surface, tool.

**УДК 621.7.011**

# ПОДАВЛЕНИЕ ВНЕКОНТАКТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ

*НГО КАО КЫОНГ*[1,a], *аспирант,*
*С. А. ЗАЙДЕС*[1,b], *доктор техн. наук, профессор*

[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
e-mail: [a]cuong.istu@gmail.com, [b]zsa@istu.edu

**Аннотация**: С помощью программного комплекса ANSYS определена возможность создания стесненных условий при локальном деформировании путем устранения пластической волны внеконтактной деформации. Рассмотрено влияние нескольких типов конструкций деформирующих инструментов на напряженно-деформированного состояния модели и величину пластической волны вне зоны нагружения.

**Ключевые слова:** упрочнение, стесненная деформация, напряженно-деформированное состояние, упругопластическая деформация, пластическая волна.

**Состояние вопроса.**

При упрочнении маложестких изделий типа валов, осей, штанг преимущества локальных методов упрочнения резко снижаются. Причиной является низкая изгибная жесткость деталей при воздействии рабочего инструмента. Поперечная деформация приводит к изгибу заготовки и к неравномерному распределению остаточных напряжений по длине изделия. Неустойчивость напряженного состояния приводит к последующему искривлению изделия во времени [1].

Снижая частоту вращения заготовки или величину радиальной нагрузки, можно уменьшить искривление вала, но при этом снижается и напряженное состояние в очаге деформации, и. как следствие, не достигаются необходимые параметры упрочнения поверхностного слоя, как по напряженному состоянию, так и по величинам шероховатости.

С учетом вышеизложенного возникает вопрос о необходимости интенсификации напряженно-деформированного состояния существующих технологических способов поверхностного пластического деформирования для достижения высоких качественных показателей при обработке маложестких деталей.

Вторым важным моментом при упругопластическом деформировании поверхностного слоя является внеконтактная деформация при внедрении рабочего инструмента в поверхность упрочняемой детали. Внеконтактная деформация возникает при формировании пластических волн материала вокруг инструмента. Наличие пластической волны следует считать отрицательным фактом, так как она увеличивает зону контакта в очаге деформации, повышает трение, уменьшает поступление технологической смазки, снижает усталостную прочность материала, поскольку возникающие в волне растягивающие напряжения способствуют развитию микродефектов (микротрещин). Поэтому в процессе упрочнения необходимо стремиться к уменьшению размеров пластической волны.

Известно [4], что в классической теории пластичности и сопротивлении материалов существуют два термина «свободное кручение» и «стесненное кручение». Ввиду совпадения физического смысла этих терминов с рассматриваемой проблемой целесообразно ввести соответствующую терминологию и в теорию процессов упрочнения.

Свободное (локальное) упрочнение – упрочнение, при котором размер и форма очага пластической деформации определяется естественным пластическим течением металла. Очевидно, что при локальных методов упрочнения под индентором возникает локальная зона пластического течения.

Стесненное упрочнение – упрочнение, при котором размер и форма очага пластической деформации отличается от локального способом нагружения и ограниченным пластическим течением металла в ограниченном пространстве. Поэтому более интенсивно растет зона пластического деформирования.

Таким образом, под стесненной деформацией понимают, процесс, происходящий в ограниченных условиях закрепления или нагружения. Стесненные условия нагружения приводят к увеличению интенсивности деформации. При наличии стесненных условий меняется характер перемещений и деформаций изделия [2].

Стесненные условия деформирования еще не получили широкого распространения и являются новым направлением совершенствования технологических процессов машиностроения. Известны работы, например [2,3], по разработке технологии правки маложестких валов и осей в

стесненных условиях нагружения и работа [5] по снижению утонения при использовании формоизменяющих операций листовой штамповки.

**Постановка задачи.** Пластическая волна при внедрении шара в поверхность объемного упруго-пластического тела образуется благодаря свободной поверхности, которая позволяет воспринимать обратное внеконтактное течение металла из очага деформации. Если наложить ограничение на это пластическое течение, то условие деформирования металла при внедрении шара должны измениться и оказать влияние на изменение механических свойств.

В работе рассматривается возможность создания стесненных условий при локальном деформировании путем уменьшения размеров пластической волны внеконтактной деформации, что способствует интенсификации напряжений и деформаций в очаге упруго-пластического формоизменения при нагружении плоской поверхности шаром. При внедрении шара в зоне контакта возникает осесимметричный очаг деформирования, характеризуемый контактной и внеконтактной поверхностью. Стремление к повышению качества поверхностного слоя приводит к необходимости интенсификации процесса ППД.

Таким образом, техническая идея работы заключается в том, чтобы погасить волновые течения металла из очага пластической деформации. Это позволит уменьшить размеры пластической волны и интенсифицировать напряженное и деформированное состояние в объеме тела.

Для достижения указанной цели в работе использована прикладная программа ANSYS, предназначенная для расчета задач механики деформируемого твердого тела.

**Постановка машинных экспериментов.** Расчеты, выполненные в работе [6], позволили выявлять размеры пластической волны при внедрении шара на глубину 1 мм в стальное тело. Они составили: ширина волны 4,73 мм, высота 0,06 мм. В этой же работе было установлено, что стесненные условия закрепления образца влияют на напряжено-деформированное состояние нагруженного тела.

Для устранения формирования волны при пластическом течении металла предложено использовать кольцо, ширина которого соответствует ширине волны, а внутренний диаметр обеспечивает внедрение шара на заданную глубину (в наших опытах 1 мм). Это кольцо плотно прижимается к поверхности тела, и в него внедряется шар. После этого шар и кольцо снимаются, и происходит разгрузка металла. Для усиления эффекта подавления пластической волны были выполнены расчеты при вдавливании кольца на глубину 0,02 мм и кольца с выпуклой поверхностью, которая зеркально отражает форму поперечного сечения волны на глубину 0,06 мм. Конечно-элементная модель схемы нагружения представлена на рис. 1.

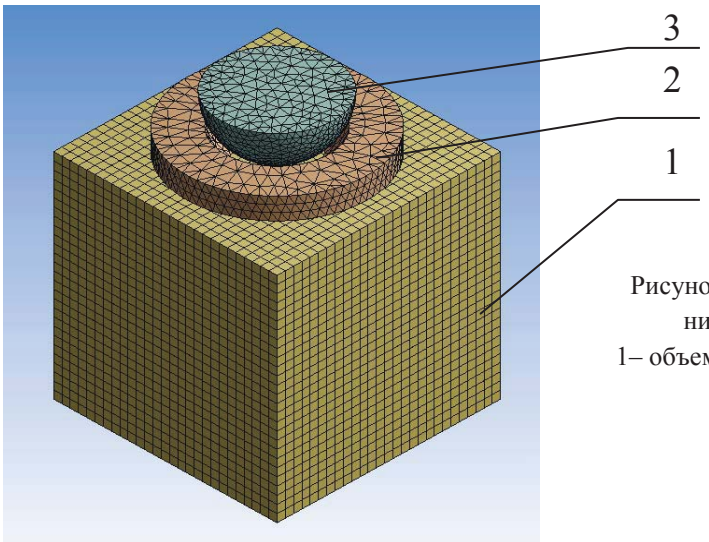



Рисунок 1 – Конечно-элементная модель нагружения при стесненном условии упрочнения
1– объемное тело; 2 – кольцо; 3– шар.

Приняты следующие параметры моделирования: шар радиусом 5 мм и кольцо из твердого сплава ВК8, имеющего размеры 16х6х2 мм, блок (20х20х20 мм) из стали 45 ($\sigma_т$= 360 МПа); глубина внедрения шара 1 мм.

Для оценки напряженно - деформированного состояния в разных точках по глубине модели определяли эквивалентное напряжение, остаточные нормальные напряжения по осям Oz, Ox, Oy. Критерий напряжения по Мизесу основывается на теории Мизез-Хенки (Mises-Hencky), также известной как теория энергии

формоизменения. При использовании главных напряжений $\sigma_1$, $\sigma_2$ и $\sigma_3$, напряжение по Мизесу $\sigma_{экв}$ вычисляется как [7]:

$$\sigma_{экв} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}.$$

После проведения моделирования полученные результаты расчета представлены в таблице

Таблица – Результаты моделирования и расчета

| Способы упрочнения | $\sigma_{экв}$ МПа | $\sigma_z^{ост}$ МПа | $\sigma_{y,x}^{ост}$ МПа | Размеры волны, мм | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | h мм | l мм |
| Без кольца | 385 | -218 | -584 | 0,06 | 4,735 |
| С наложением кольца на поверхность | 417 | -233 | -627 | 0,02 | 3,955 |
| Вдавление кольца на глубину 0,02 мм | 427 | -223 | -630 | 0,003 | 1,042 |
| Вдавление кольца с выпуклой поверхностью на глубину 0,06 мм | 439 | -224 | -634 | 0 | 0 |

**Обсуждение результатов.** В таблице представлены результаты расчета влияния схемы нагружения на напряжено-деформированном состоянии образца и геометрические параметры волны. Выявлено, что при свободном нагружении упруго-пластического тела шаром формируется пластическая волна наибольших размеров при минимальных значениях эквивалентного напряжения, которое косвенно характеризует степень упрочнения материала.

Наложение ограничений на пластическую деформацию изменяет напряженно-деформированное состояние нагруженного тела. Так, при воздействии плоского кольца на зону образования пластической волны происходит снижение ее высоты в 3 раза, и на 20 % уменьшается длина волны. При вдавливании плоского кольца на глубину, равную высоте волны (0,02 мм), ее размеры существенно снижаются: высота в 20 раз, а длина почти в 5 раз.

Наилучшие результаты получены и при вдавливании кольца с выпуклой поверхностью: высота и длина пластической волны практически исчезают. Анализ результатов моделирования показывает, что размеры очага деформации зависит от размеров и формы упрочняющего инструмента. Использование комбинированного инструмента в виде шара с кольцом позволяет практически полностью подавить образование пластической волны и повысить интенсивность напряженного состояния на 10 – 15 %.

Программа расчета напряженного состояния позволила определить и остаточные напряжения при внедрении шара. Как видно из табл., с помощью кольца была выполнена интенсификация напряженного состояния в очаге деформации так как достижимые значения всех напряжений увеличиваются. Кроме того, размеры пластической волны, которая считается отрицательным фактором, по сравнению со схемой свободного нагружения, уменьшаются в 20 раз по высоте и в 4 – 5 раз по длине.

Такое явление объясняется тем, что кольцо с шаром можно считать как второй деформирующий элемент. Поэтому очаг деформации в зоне внедрения представляет собой перекрытие очагов деформации двух инструментов и их слияние в один комплексный очаг. Наличие кольца меняет естественное течение частиц металла. При этом металл поверхностного слоя образца находится в условиях сложного напряженного состояния, испытывает интенсификацию напряжений, уменьшает размеры пластической волны.

**Выводы.** Представленные результаты моделирования и численного расчета напряженно-деформирования состояния при внедрении жесткого шара в упругопластическое тело показывают высокую эффективность использования стесненных условий деформирования как для подавления процесса пластического внеконтактного формообразования, так и для изменения напряженного состояния деформированного тела.

Полученные данные расчетов дают основание для разработки конструкции деформирующего инструмента для отделочно-упрочняющей обработки маложестких валов.

## Список литературы

1. *Зайдес С.А.* Деформирующая обработка валов: монография / С.А. Зайдес В.Н. Емельянов, М.Е. Попов, Е.Ю. Кропоткина, А.С. Бубнов // под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – 452 с.

2. *Зайдес С.А.* Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. – 309 с.

3. *Бубнов А.С.* Правка валов стесненным сжатием / А.С. Бубнов, С.А. Зайдес // 2-ая Международная научно-техническая конференция «Технические науки, технологии и экономика» – Чита: ЧитГТУ, 2002. С. 84 – 91.

4. *Воронцов А. Л.* Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие: в 2 т. / А. Л. Воронцов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.

5. *Ершов В.И.* Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки / В.И. Ершов, В.И. Глазков, М.Ф Каширин. – М.: Машиностроение, 1990. – 311 с.

6. *Нго К.* К Определение внеконтактных деформаций при упруго-пластическом нагружении углеродистой стали / К.К. Нго, С.А. Зайдес // Жизненный цикл конструкционных материалов: сб. тр. V Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Иркутск, 2015 г. / под ред. С. А. Зайдеса. - Иркутск : Изд-во Иркут. гос. техн. ун-та, 2015.

7. *Бруяка В.А.* Инженерный анализ в ANSYS Workbech: учеб. пособ. / В.А. Бруяка, В.Г. Фокин, Я.В. Кураева. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.

# SUPPRESSION OF OUTSIDE CONTACT DEFORMATION TO THE CONSTRAINED CONDITIONS OF THE LOCAL LOADING

**Ngo Cao Cuong**[1], Postgraduate, e-mail: cuong.istu@gmail.com
**Zaides S. A.**[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: zsa@istu.edu

[1]Irkutsk national research technical university, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation.

**Abstract:** The mathematical model of hardening process was built based on the small elastic deformation theory and the finite element method, which allows to define dimensions of waves outside plastic deformation contact. Using ANYS software helps find out the possibility of creating cramped conditions in the local deformation to eliminate waves outside plastic deformation contact. Considering the influences of several types of deforming tool on the stress and strain state of the model and the amount of plastic out of the influenced area.

**Keywords:** hardening, constrained deformation, the stress and strain state, elastic-plastic deformation, plastic wave.

**УДК 621.797**

# ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРСИЛИКАТНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ВЕРМИКУЛИТА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

*Л. Б. ЛЕОНТЬЕВ*[1,a], *доктор техн. наук, профессор*
*Н. П. ШАПКИН*[1,b], *доктор техн. наук, профессор*
*А. Л. ЛЕОНТЬЕВ*[1,c], *канд. техн. наук, докторант*
*В. Н. МАКАРОВ*[1,d], *аспирант*

[1]Дальневосточный федеральный университет, 690990, г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: [a]leontyev.l.b@yandex.ru, [b]npshapkin@gmail.com,
[c]gfi25leontev@mail.ru, [d]makarov_vasily@mail.ru

**Аннотация:** Решение проблемы радикального повышения долговечности пар трения связано с применением новых ресурсосберегающих технологий, позволяющих получать поверхностные слои детали со свойствами, существенно отличающимися от свойств металла детали. Установлено, что модифицирование вермикулита кислотой позволяет уменьшить количество абразивных элементов и размер частиц до 6–10 нм. Для увеличения долговечности трибосопряжения «вал – вкладыш» и снижения потерь на трения шейки коленчатого вала необходимо модифицировать нанокомпозитами: вермикулитом, модифицированным кислотой и производной молибдена или целлюлозой, которые позволяют повысить износостойкость трибосопряжения более чем в 5 раз и уменьшить коэффициента трения по сравнению с парой трения без покрытия на 400%.

**Ключевые слова**: вермикулит, нанокомпозит, изнашивание, покрытие, ресурс.

**Введение**

Как известно, причина низкого ресурса деталей обусловлена преимущественно износом их поверхностных слоев. Решение проблемы радикального повышения долговечности связано с применением новых ресурсосберегающих технологий, позволяющих получать поверхностные слои детали со свойствами, существенно отличающимися от свойств металла детали. В настоящее время повышение надежности машин, механизмов и оборудования представляет собой актуальную проблему и возможно при решении следующих технологических задач: разработки современных износостойких материалов, выбора оптимального сочетания материалов для конкретных условий работы трибосопряжений и разработки оптимальной технологии формирования износостойкого покрытия на детали.

Основные трибологические характеристики (интенсивность изнашивания и коэффициент трения $k_{тр}$) зависят от физико-химического состояния контактирующих материалов и условий их работы. В настоящее время существуют реальные возможности управления формированием тонкопленочных покрытий на поверхностях трения стальных деталей, которые позволяют уменьшить параметры шероховатости поверхности, а также повысить твердость и износостойкость, и, соответственно, обеспечить заданный ресурс узла трения [1, 2].

Объектом исследования являются триботехнические материалы, позволяющие повысить износостойкость узлов трения путем формирования износостойких металлокерамических покрытий на поверхностях трения. Они применяются как в технологических процессах упрочнения поверхностей, так и в качестве добавок в смазку для создания смазочных композиций и получения на поверхностях трения металлокерамического износостойкого покрытия [1–3].

Существенным недостатком природных слоистых силикатов является их повышенная абразивность, особенно в период формирования покрытия [1], что ограничивает их применение для модифицирования поверхностей трения трибоузлов. Кроме того, силикаты даже из одного месторождения существенно отличается по химическому составу и структуре и, соответственно, по триботехническим характеристикам.

Перспективными триботехническими материалами являются композиции на основе химически модифицированного вермикулита имеющего улучшенные триботехнические качества благодаря удалению значительной части абразивных элементов, таких как $Al_2O_3$, $TiO_2$ и др. [1].

Исследования триботехнических свойств покрытий проводили для условий сопряжения «коленчатый вал – вкладыш подшипника скольжения» среднеоборотного судового дизеля.

**Методика экспериментального исследования**

Морфологию поверхности вермикулита после механической активации и модифицирова-

ния кислотой изучали с помощью аналитического автоэмиссионного растрового электронного микроскопа для исследования наноструктур Zeiss ULTRA 55 Plus, оснащенным энергодисперсионным детектором Oxford Instruments X-MAX 80.

Триботехнические испытания проводили на универсальной машине трения модели УМТВК по схеме "ролик – колодка" в условиях граничного трения при постоянной скорости скольжения 0,63 м/с. В качестве неподвижного образца использовались колодки, вырезанные из вкладыша подшипника типа *«Rillenlager»* («Miba» 33). Ролик изготавливали из стали 40Х твердостью 236 НВ. Смазку пары трения осуществляли капельным способом (5–6 капель в минуту). Для смазки применялось дизельное масло марки М-14-$Д_2$(цл 30) ГОСТ 12337-84 (вязкость при 100 ºС – 19,8 сСт, щелочное число – 20 мг КОН / г).

Износ образцов определяли весовым способом на лабораторных весах с ценой деления 0,1 мг марки AUW 220D фирмы Shimadzu (Япония).

Формирование тонкопленочного износостойкого покрытия выполняется за две технологические операции [1].

1. Трибомодифицирование поверхности трения и формирование отдельных участков покрытия. Содержание триботехнического состава в смазке составляло 40% по массе.

2. Формирование износостойкого металлокерамического покрытия (смазка подается в зону трения без модификатора).

Модифицирование поверхностей трения осуществляли фрикционным методом. Модифицирующий состав, состоящий из модифицирующего материала и масла, наносится на упрочняемую поверхность. В процессе упрочнения данная смесь подается в зону трения каждые 15–20 с капельным методом.

Нагрузку при трибомодифицировании, формировании покрытия и трибоиспытаниях изменяли в соответствии с режимами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1 – Режимы трибомодифицирования поверхности, формирования покрытия и триботехнических испытаний

| Нагрузка, Н | 40 | 100 | 200 | 400 |
|---|---|---|---|---|
| Время триботехнического материала, мин | – | 1 | 1 | 1 |
| Время формирования покрытия, мин | – | 5 | 10 | 45 |
| Время трибоиспытаний, ч | 0,5 | 0,5 | 1 | 1 |

Температуру в зоне фрикционного контакта определяли с помощью инфракрасного пирометра Optris Mimisight (Германия) с точностью ± 1 °С в диапазоне от 0 до 420 °С.

**Результаты и их обсуждение**

В качестве базового материала для исследования был взят вермикулит, имеющий следующий элементный состав (%): $SiO_2$ – 42.73, $Al_2O_3$ – 11.78, MgO – 29.47, $Fe_2O_3$ – 8.72, CaO – 5.75, $TiO_2$ – 0.85, $K_2O$ – 0.14, MnO – 0.17, $Cr_2O_3$ – 0.39.

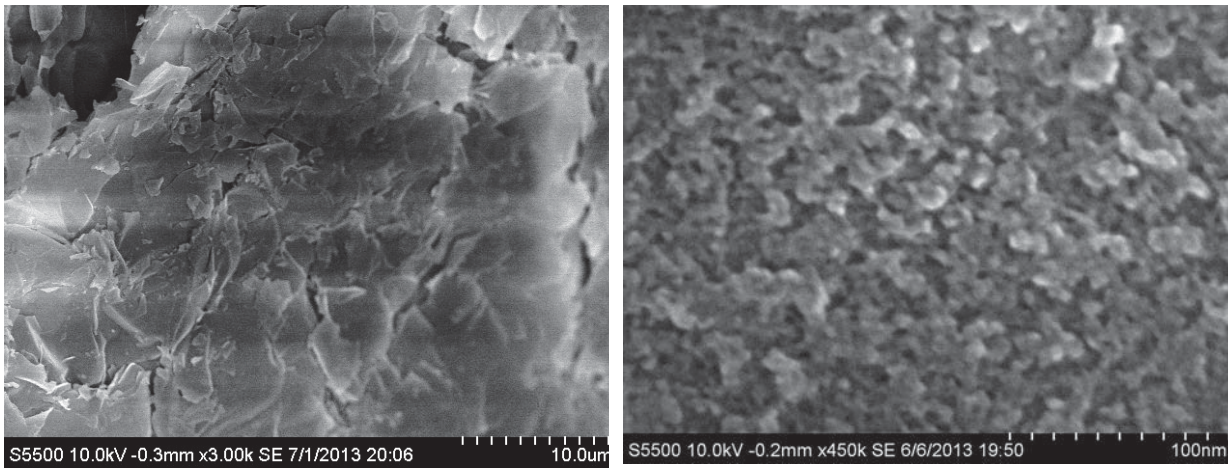
Элементный состав алюмосиликата после модифицирования соляной кислотой (%): $SiO_2$ – 80.63, $Al_2O_3$ – 5.18, MgO – 1.06, $Fe_2O_3$ – 0.34, CaO – 1.01, $TiO_2$ – 0.17, $K_2O$ – 0.36, MnO – 0.17, Cl – 2.19, другие – 0.19.

Полифенилсилоксан (ПФС) имеет стабильный химический состав $[C_6H_5SiO_{1,5}]_n$ и слоистую структуру. Кроме того, обеспечивается возможность плакирования частиц вермикулита силоксаном для его модифицирования и снижения абразивных свойств и улучшения триботехнических. При этом создается минеральная силикатная основа, на которой формируется полимерное силикатное покрытие.

Целлюлоза и производная молибдена использовались для механохимического модифицирования вермикулита, так как механическая активация при создании композиций материалов менее эффективна для улучшения триботехнических свойств [1].

Морфологию поверхности исходного и модифицированного кислотой вермикулита изучали с помощью растровой электронной микроскопии. Исходный вермикулит после механической активации (рис. 1*а*) имеет плотную кристаллическую поверхность гидрослюды и размер частиц примерно 5 мкм. После обработки кислотой размеры частиц уменьшаются до 6–10 нм (рис. 1*б*). Таким образом, модифицирование вермикулита кислотой позволяет уменьшить как количество абразивных элементов, так и размер частиц на два порядка.

Использование вермикулита (табл. 2) приводит к значительному износу упрочняемой стали на этапах формирования покрытия и в процессе трибоиспытаний сопряженной детали. Композиция вермикулита с ПФС обладает лучшими триботехническими свойствами по сравнению вермикулитом, однако на первом этапе формирования покрытия скорость изнашивания остается без изменений.




*а* *б*

Рисунок 1 – Морфология поверхности: а) исходного вермикулита; б) вермикулита, обработанного кислотой

Химическое модифицирование вермикулита кислотой позволяет существенно снизить скорости изнашивания как на этапах формирования покрытия, так и в процессе трибоиспытаний (табл. 2), однако покрытие после формирования имеет больший коэффициент трения (табл. 3).

Триботехнические испытания позволили установить, что создание металлокерамических покрытий на поверхности стали на основе вермикулита (табл. 2 и 3) позволяет существенно снизить скорость ее изнашивания и коэффициент трения в условиях трения при граничной смазке. Однако композиты обладают улучшенными триботехническими свойствами по сравнению даже с вермикулитом, модифицированным кислотой, т.к. обеспечивают высокую износостойкость покрытия и сопряжения в целом, а также низкий коэффициент трения. Более высокая температура в зоне трения объясняется низкой теплопроводностью образовавшегося металлокерамического покрытия.

Наиболее оптимальными триботехническими параметрами обладают покрытия, полученные при использовании нанокомпозитов: вермикулита, модифицированного кислотой и производной молибдена или вермикулита, модифицированного кислотой и целлюлозой. Металлокерамические покрытия позволяют повысить долговечность трибосопряжения более чем в 5 раз, а также снизить потери на трение (уменьшение коэффициента трения по сравнению с парой трения без покрытия достигает 400%), т.е. повысить КПД.

Таблица 2 – Скорости изнашивания стали 40Х на различных этапах формирования покрытия, деталей сопряжения в процессе трибоиспытаний и материалах для формирования покрытия

| № п/п | Триботехнический материал для формирования покрытия | Скорость изнашивания стали, мг/ч | | | Скорость изнашивания вкладыша, мг/ч |
|---|---|---|---|---|---|
| | | при модифицировании поверхности | при формировании покрытия | в процессе трибоиспытаний | |
| 1 | Сталь без упрочнения | – | – | 2,7 | 10,5 |
| 2 | Вермикулит | 64 | 3,4 | 0,6 | 6,2 |
| 3 | Вермикулит + HCl | 28 | 1,7 | **0,1** | 2,2 |
| 4 | Вермикулит + 9% ПФС | 68 | 0,1 | 0,4 | 4,1 |
| 5 | Вермикулит + HCl + 9% ПФС | 16 | 1,4 | 0,6 | 3,5 |
| 6 | Вермикулит + HCl + производная молибдена | 2 | 0,1 | 0,6 | **1,7** |
| 7 | Вермикулит + HCl + целлюлоза | 2 | 0,1 | 1,0 | 1,9 |

Примечание. Скорости изнашивания стали и антифрикционного слоя вкладыша приведены при максимальной нагрузке.

Таблица 3 – Средние величины коэффициента трения ($k_{тр}$) и максимальная температура ($t$) в зоне трибоконтакта при формировании покрытия и в процессе трибоиспытаний при различных нагрузках и материалах для формирования покрытия

| Триботехнический материал для формирования покрытия | При формировании покрытия | | В процессе трибоиспытаний | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Нагрузка на трибосопряжение, Н | | | |
| | | | 200 | | 400 | |
| | $k_{тр}$ | $t$, °С | $k_{тр}$ | $t$, °С | $k_{тр}$ | $t$, °С |
| Сталь без упрочнения | – | – | 0,085 | 25 | 0,079 | 32 |
| Вермикулит | 0,072 | – | 0,028 | 35 | 0,018 | 43 |
| Вермикулит + HCl | 0,072 | – | 0,057 | 28 | 0,036 | 38 |
| Вермикулит + 9% ПФС | 0,022 | 63 | 0,043 | 37 | 0,029 | 45 |
| Вермикулит + HCl + 9% ПФС | 0, 014 | 66 | 0,057 | 28 | **0,014** | 43 |
| Вермикулит + HCl + производная молибдена | 0,014 | 54 | 0,020 | 22 | 0,022 | 32 |
| Вермикулит + HCl + целлюлоза | 0,014 | 65 | 0,021 | 24 | **0,014** | 32 |

Следует также отметить низкий коэффициент трения в процессе формирования покрытия при использовании композитов.

**Выводы**

Таким образом, для увеличения долговечности трибосопряжения «вал – вкладыш» и снижения потерь на трения шейки коленчатого вала необходимо модифицировать нанокомпозитами: вермикулитом, модифицированным кислотой и производной молибдена или вермикулитом, модифицированным кислотой и целлюлозой. При использовании данных нанокомпозитов износостойкость трибосопряжения повышается более чем в 5 раз, а уменьшение коэффициента трения при граничной смазке по сравнению с парой трения без покрытия достигает 400%.

Исследование выполнено при поддержке ДВФУ, проект №14-08-03-8_и.

## Список литературы

1. *Леонтьев Л.Б.*, *Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л., Макаров В.Н.* Особенности формирования износостойкого металлокерамического покрытия на поверхностях трения стальных деталей // Металлообработка. 2014, №6(84). С. 41–51.

2. *Погодаев Л.И.* Влияние геомодификаторов трения на работоспособность трибосопряжений // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2005, № 1. – С. 58–66.

3. *Леонтьев Л.Б.*, *Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л., Токликишвили А.Г.* Исследование влияния состава триботехнических материалов на эксплуатационные свойства сопряжения «вкладыш – шейка коленчатого вала» // Фундаментальные исследования. №12 (часть 4), 2014. С. 735–739.

# APPLICATION NANOCOMPOSITES BASED ON VERMICULITE FOR FORMATION WEAR-RESISTANT COATINGS

**Leontev L. B.**[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: leontyev.lb@yandex.ru
**Shapkin N. P.**[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: npshapkin@gmail.com
**Leontyev A. L.**[1], C.Sc. (Engineering), Doctoral, e-mail: gfi25leontev@mail.ru
**Makarov V. N.**[1], P.G. (Engineering), e-mail: makarov_vasily@mail.ru

[1]Far Eastern Federal University, 8 street Sukhanova, Vladivostok, 690990, Russian Federation

**Abstract:** Addressing a radical increase in longevity of friction pairs associated with the use of new resource-saving technologies, allowing to receive details of the surface layers with properties substantially different from the properties of the metal parts. It was established that the modification of the vermiculite acid reduces the amount of the abrasive elements and the particle size 6-10 nm. To increase durability tribo "shaft - liner" and reduce friction losses crankshaft must be modified nanocomposites: vermiculite and acid-modified cellulose derivative or molybdenum, which can improve durability tribo more than 5 times and reduce the coefficient of friction as compared with a pair of friction Uncoated 400%.

**Keywords:** vermiculite, nanocomposite, wear, cover, resource.

**УДК 621.787.4**

# НАСЛЕДСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССАХ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*М. С. МАХАЛОВ*, *канд. техн. наук, доцент*

ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»
650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28 E-mail: maxim_ste@mail.ru

**Аннотация:** Показана актуальность вопросов исследования и создания расчетных алгоритмов остаточных напряжений (ОН) при сложных видах нагружения на стадиях жизненного цикла изделия. Представлена конечно-элементная модель формирования ОН при упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием, учитывающая явление технологического наследования. Особенностью модели является учет трансформации свойств, полученных на предыдущих стадиях изготовления, а также учет изменения этих свойств по мере продвижения частиц металла через пространство очага деформации на рассматриваемой стадии нагружения.

**Ключевые слова:** Остаточные напряжения, технологическое наследование, поверхностный слой, упрочняющая обработка, поверхностное пластическое деформирование

**Введение**

Известно, что остаточные напряжения (ОН) первого рода являются одним из ключевых параметров состояния металла ответственных деталей машин и промышленных конструкций в значительной степени определяющих их эксплуатационную долговечность. Особенно велико влияние ОН на долговечность при различных видах знакопеременных нагрузок, при этом важную роль играет как величина, так и характер распределения ОН по сечению деталей. Известно, что при появлении на поверхности детали концентратора напряжений или начальной трещины положительное влияние сжимающих ОН в поверхностном слое (ПС) резко возрастает и может привести к увеличению долговечности детали в несколько раз [1].

Основным условием возникновения ОН первого рода является неравномерная в том или ином сечении детали пластическая деформация механической или тепловой природы. Однако в силу сложности процессов силового и температурного нагружения деталей на стадиях производства и эксплуатации точный расчет напряжений, действующих в той или иной части детали или конструкции, не всегда представляется возможным [2].

Большинство расчетных методов определения НДС основано на использовании значительного числа допущений, идеализирующих расчетные схемы, действующие нагрузки и граничные условия, что дает существенные погрешности в оценке напряжений, а в ряде случаев приводит к невозможности получения теоретических решений.

Особенно актуальной такая задача становится, когда речь идет об определении ОН в процессах механической обработки и последующей эксплуатации изделия в условиях приложения сложных видов нагружения.

Помимо того, что формирование ОН на каждой и вышеназванных стадий носит сложный характер, значительное влияние на формирование и трансформацию ОН имеет явление технологического наследования (ТН), поскольку на формирование ОН на каждой последующей стадии оказывает влияние напряженно-деформированное состояние (НДС) металла, полученное деталью на предыдущих стадиях.

**Теория**

Среди способов механической обработки широкими возможностями по созданию в ПС благоприятных сжимающих ОН близких по величине к пределу текучести металла обладают способы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) (рис. 1) [3].

При обработке ППД в зоне контакта деформирующих инструментов с деталью возникает асимметричный очаг деформации (ОД) ***ABCDEFG***, характеризуемый линиями контура передней внеконтактной ***ABC*** (зона 1), передней контактной ***CD*** (зона 2), задней контактной ***DE*** (зона 3) и задней внеконтактной ***EF*** (зона 4) поверхностей, а также линией ***FGA***, описывающей границу зоны пластического течения металла. Вследствие деформации частицы металла смещаются в зоне волнообразования некоторых вдоль линий тока, формируя ПС детали (рис. 1). Начальные параметры состояния, которые частицы металла имели до входа в очаг деформации (линия ***AG***), трансформируются в накопленные к моменту их выхода из ОД (линия ***GF***).

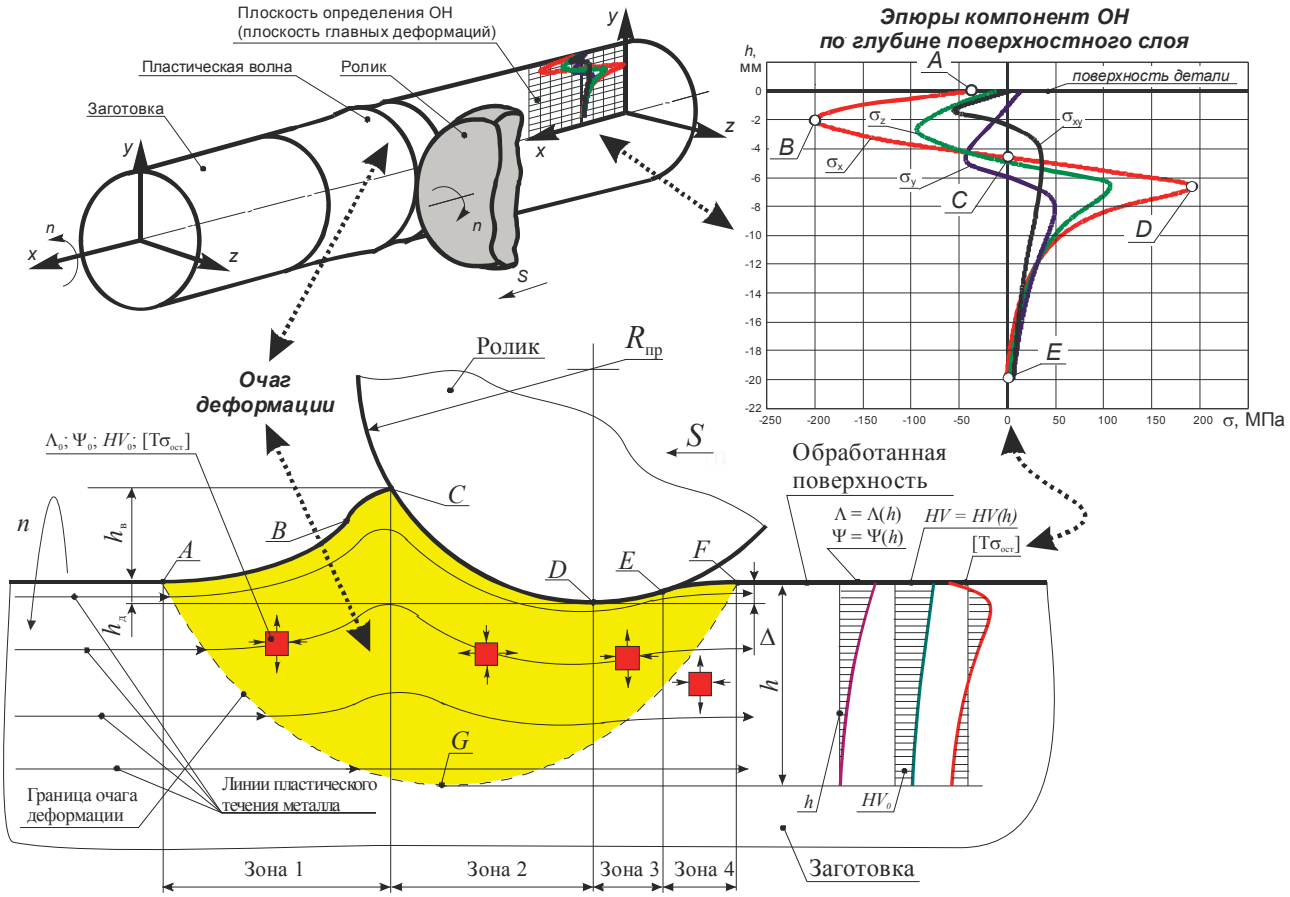



Рисунок 1 – Схема очага деформации в плоскости подачи при обработке ППД

Решение задачи аналитического определения ОН после сложных видов нагружения с учетом явления ТН возможно на основе аппарата механики деформируемых тел и методологии механики технологического наследования, в рамках которых:

- формирование и трансформация состояния поверхностного слоя (ПС) на стадиях механической обработки и последующего эксплуатационного нагружения рассматриваются как единый непрерывный процесс накопления деформации, исчерпания запаса пластичности и трансформации ОН металлом поверхностного слоя. При этом, наряду с традиционными параметрами качества, для описания свойств ПС используются соответственно: накопленная степень деформации сдвига (СДС) $\Lambda$, степень исчерпания запаса пластичности (СИЗП) $\Psi$ и компоненты тензора остаточных напряжений $[T\sigma_{ост}]$ в системе координат, связанной с формой детали или элемента конструкции;

- формирование и трансформация остаточных напряжений на стадиях механической обработки при изготовлении рассматриваются как следствие сложного немонотонного нагружения металла в очаге пластической деформации (ОД), при котором происходит накопление деформации и исчерпание запаса пластичности металлом поверхностного слоя (ПС);

- формирование ОН происходит в условиях изменяющихся вследствие пластической деформации механических свойств металла, т.е. на протекание процессов в каждой точке траектории внутри ОД влияет история нагружения;

- итоговые ОН проявляют себя в процессе эксплуатации, трансформируясь в каждом цикле эксплуатационного нагружения; долговечность определяется всей предисторией нагружения.

Согласно современных представлений, тензор ОН представляет собой разность напряжений, возникающих в реальном упругопластическом теле при приложении нагрузки $[T\sigma_{деф}]$, и напряжений, которые возникали бы в идеально упругом теле при идентичном нагружении $[T\sigma_{раз}]$, суммированную с тензорами напряжений упругой разгрузки при раскреплении детали $[T\sigma_{раскр.дет.}]$ и упругих тепловых напряжений разгрузки $[T\sigma_{t^0}]$ [4-5]:

$$[T\sigma_{ост}] = [T\sigma_{деф}] - [T\sigma_{раз}] + [T\sigma_{раскр.дет.}] + [T\sigma_{t^0}] \quad (1)$$

В соответствии с используемым аппаратом механики технологического наследования:

- на каждой стадии механической обработки

в ОД (как это представлено выше на примере обработки ППД) происходит непрерывное накопление деформации и исчерпание запаса пластичности, которое приводит к формированию поверхностного слоя с определенными параметрами качества: глубиной и степенью упрочнения, шероховатостью и остаточными напряжениями;

- в процессе эксплуатационного усталостного нагружения продолжается процесс накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности, протекающий в условиях непрерывной релаксации остаточных напряжений. При накоплении предельных деформаций ( $\Lambda = \Lambda_p$ ) происходит полное исчерпание запаса пластичности ($\Psi = 1$). Этому состоянию соответствует релаксация тензора остаточных напряжений первого рода до пренебрежимо малых значений ( $\left[T\sigma_{ост}\right] \approx 0$ ) и появление усталостной трещины. Накопление предельных деформаций, полное исчерпание запаса пластичности и зарождение усталостной трещины происходит в некоторой точке вероятного разрушения, которая может быть расположена как на поверхности, так и на некотором удалении от нее. Результирующее напряженное состояние определяется тензорами остаточных напряжений и напряжений от внешней нагрузки. При совпадении направлений векторов главных напряжений для обеих составляющих и симметричном цикле усталостных напряжений поверхностный слой изделия работает в условиях асимметрии цикла тем большей, чем больше остаточные напряжения. Среднее напряжение цикла при этом равно остаточному напряжению, а амплитуда равна напряжению от внешней нагрузки. В условиях циклического нагружения сжимающие остаточные напряжения повышают, а растягивающие - снижают усталостную долговечность;

- на каждой стадии механической обработки или эксплуатации формирование остаточных напряжений происходит под влиянием:

- степени деформации, накопленной металлом на текущий момент времени;

- остаточных напряжений, сформированных на предыдущей стадии;

- механических и тепловых напряжений, возникающих при приложении нагрузки на рассматриваемой стадии нагружения;

- напряжений упругой разгрузки при снятии нагрузки;

- напряжений, дополнительно возникающих при раскреплении детали.

Таким образом, для полноценного учета явления ТН и его влияния на формирование итоговых свойств металла ПС необходимо создание теоретических модельных представлений о трансформации напряженно-деформированного состояния металла не только с учетом трансформации свойств, полученных на предыдущих стадиях изготовления и эксплуатации, но и с учетом изменения этих свойств по мере продвижения частиц через пространство ОД на текущей стадии нагружения.

Для создания таких представлений при упрочняющей обработки ПС металла ППД роликовым инструментом была разработана модель конечно-элементная формирования ОН, учитывающая трансформацию свойств металла в ОД, а также рассчитаны указанные выше интегральные параметры механического состояния металла.

При создании модели были приняты следующие начальные условия и допущения:

1. Возникающие деформации имели только механическую составляющую и, соответственно, формирование ОН происходило от механического нагружения стержня. Температурная составляющая не учитывалась ввиду малого нагрева при рассматриваемом нагружении.

2. Моделируемый материал принимался изотропным с параметрами механического состояния, соответствующими параметрам стали 45 (ГОСТ 1050-88) в состоянии поставки.

3. Использовалась билинейная аппроксимация кривой течения, учитывающая упрочнение металла (рис. 2), для описания которой необходимо знать следующие параметры:

- модуль Юнга $E$, характеризующий угол наклона упругого участка $\alpha$;

- экстраполированный предел текучести $\sigma_{эт}$, соответствующий отрезку на оси напряжений, определяемому продолжением участка пластического течения;

- коэффициент Пуассона $\nu$;

- тангенциальный модуль $T_{мод}$, характеризующий угол наклона участка пластического течения $\beta$.

4. На данном этапе исследований, для упрощения расчетов, ввиду относительно невысокой величины возникающей погрешности, не учитывался эффект Баушингера.

5. Тензор напряжений упругой разгрузки при раскреплении детали был принят нулевым, поскольку с одной стороны при обработке ППД выполнялся ряд условий, указанных А.Н. Овсеенко для обработки симметричных цилиндрических деталей [6], а с другой - модель детали имела достаточно большие по сравнению с возникающим очагом деформации геометрические размеры. Это позволяет говорить о том, что влияние границ модели заготовки на значения компонент моделируемых напряжений носит минимальный характер и не оказывает значительного влияния на эпюру тензора ОН.

Моделирование процесса обработки ПС ППД является сложной задачей в силу главным образом того обстоятельства, что ПС металла изделия подвергается сложному немонотонному

нагружению в очаге пластической деформации. При этом, если рассматривать плоскость главных деформаций (рис. 1), перемещение ОД в направлении подачи носит дискретный характер: новый ОД возникает со смещением относительно предыдущего на величину подачи, которая при обработки ППД обычно варьируется в пределах 0,05-0,3 мм/об.

В ранних КЭ-моделях процессов ППД, резания и размерного совмещенного обкатывания, предложенных В.Ю. Блюменштейном, А.А. Кречетовым и автором, указанная дискретность не моделируется, что с одной стороны упрощает как саму модель, так и последующие расчеты параметров механического состояния, а с другой – является ее недостатком.

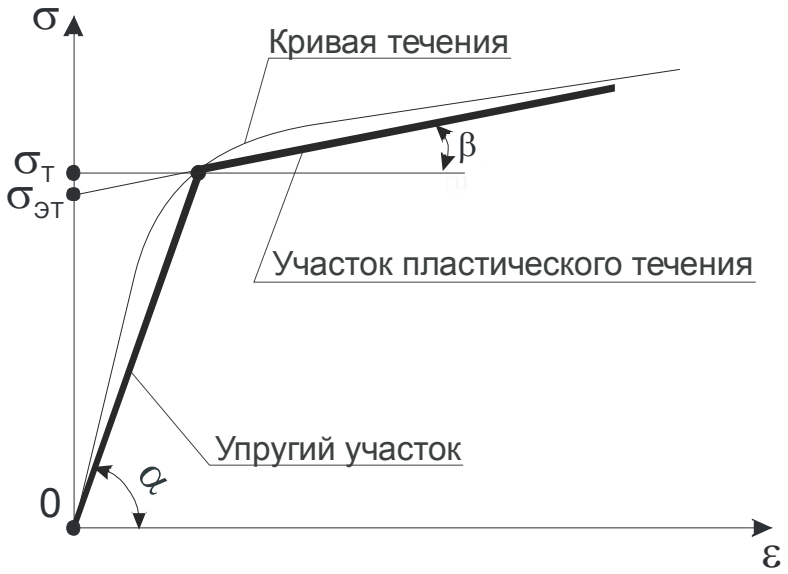



Рисунок 2 – Билинейная аппроксимация кривой течения

В ранее использованных постановках верхняя граница модели обрабатываемой заготовки представляла собой контур очага деформации, восстановленный по соответствующей профилограмме. Зона контакта с роликом моделировалась в виде дуги окружности, радиус которой соответствовал профильному радиусу ролика (рис. 1). Нижняя граница модели жестко закреплялась по обеим осям, индентору придавалось однократное смещение по оси $x$ на величину подачи $S$.

Описанная постановка позволяла смоделировать «мгновенные» значения напряжений и деформаций, возникающие в пространстве ОД. Учет остальных параметров режима обработки, кроме величины подачи и размеров индентора, предполагался на основе геометрических размеров ОД, определяемых экспериментально по разработанным коллективом авторов методикам.

Особенностью такой постановки является то, что инструмент не взаимодействует со всей обрабатываемой поверхностью – моделируется лишь НДС в ОД, геометрия которого получена на основе экспериментальных данных.

При этом предполагалось, что частицы металла проходят через ОД и формируют обработанный ПС (за исключением того слоя, который, например, при резании, превращается в стружку). Проходя через пространство ОД вдоль некоторой линии тока, частица металла претерпевает сложное немонотонное нагружение, которое как раз и определяется полями напряжений и деформаций, полученными для пространства ОД КЭ моделированием.

Для расчета накопленных параметров механического состояния использовалась описанная выше методика и гипотеза о том, что на следующем этапе нагружения, которое происходит через 1 оборот детали, частица, смещаясь вдоль линии тока, меняет свое НДС на некоторое новое, расположенное в пространстве ОД со смещением от прежнего вдоль оси детали на величину подачи. При этом не учитывалось, что между этими двумя состояниями происходит разгрузка, приводящая к возникновению промежуточного напряженно-деформированного состояния, а новый шаг нагружения происходит уже в условиях изменившихся на предыдущем шаге свойств металла.

Учитывая сказанное, также становится в частности проблематичным расчет ОН с использованием ранее предложенной модели.

Предлагаемая автором КЭ-модель процесса ППД лишена указанных недостатков и имеет следующие особенности:

- многошаговое нагружение ПС детали, максимально приближенно моделирущее дискретный (с величиной подачи) (с точки зрения плоскости главных деформаций) характер взаимо-

действия деформирующего ролика с поверхностью;

- возможность моделирования ОН, сформированных после обработки, а также на промежуточных стадиях внутри очага деформации;

- учет явления ТН (истории нагружения) не только на уровне этапов жизненного цикла (стадий обработки и эксплуатации), но и внутри каждой стадии (в данном случае стадии ППД), за счет моделирования трансформации свойств обрабатываемого металла при многократном нагружении-разгрузке в процессе перемещения частицы сквозь пространство ОД.

Задача решалась в плоско-деформированной постановке. Это предполагало, что все деформационные процессы в ОД, происходят в плоскости главных деформаций, проходящей через ось вращения обрабатываемой заготовки (плоскости подачи).

По мнению В.М. Смелянского, степень деформации ПС в процессах ППД взаимосвязана с размерами продольной волны. В пользу такой точки зрения автор приводит ряд аргументов [7]:

- высота волны в продольном направлении имеет значительно большие размеры, чем в поперечном;

- плоскость подачи с механической точки зрения в большей степени отвечает понятию плоскости главных деформаций, поскольку деформации в плоскости скорости вращения меньше аналогичных в плоскости подачи и др.

Значения свойств металла и параметров кривой течения задавались по справочным материалам для стали 45 в состоянии поставки.

В качестве обрабатываемой поверхности моделировался фрагмент плоскости главных деформаций цилиндрической детали длиной $L$ = 50 мм и высотой $h$ = 20 мм (рис. 3).

Нижняя и боковые границы фрагмента жестко закреплялись по обеим осям. Размеры возникающего при обработке очага напряженно-деформированного состояния значительно меньше моделируемого фрагмента, поэтому возникающие при такой постановке краевые эффекты вносят в результаты моделирования весьма незначительную погрешность.

Индентор моделировался как абсолютно жесткое тело и представлял собой окружность, моделирующую ролик заданного профильного радиуса. Такое допущение правомерно, поскольку многочисленными исследованиями доказано, что при обработке ППД, в силу особенностей взаимодействия инструмента с поверхностью деформирующие инструменты подвергаются весьма малому износу, при этом каких-либо значимых деформаций роликов или шариков исследователями зафиксировано не было. Учитывая это, можно считать, что принятое допущение вносит в результаты моделирования очень малую погрешность.

Выбранные значения моделируемых параметров режима обработки ППД лежали примерно в серединах используемых диапазонов (табл. 1).

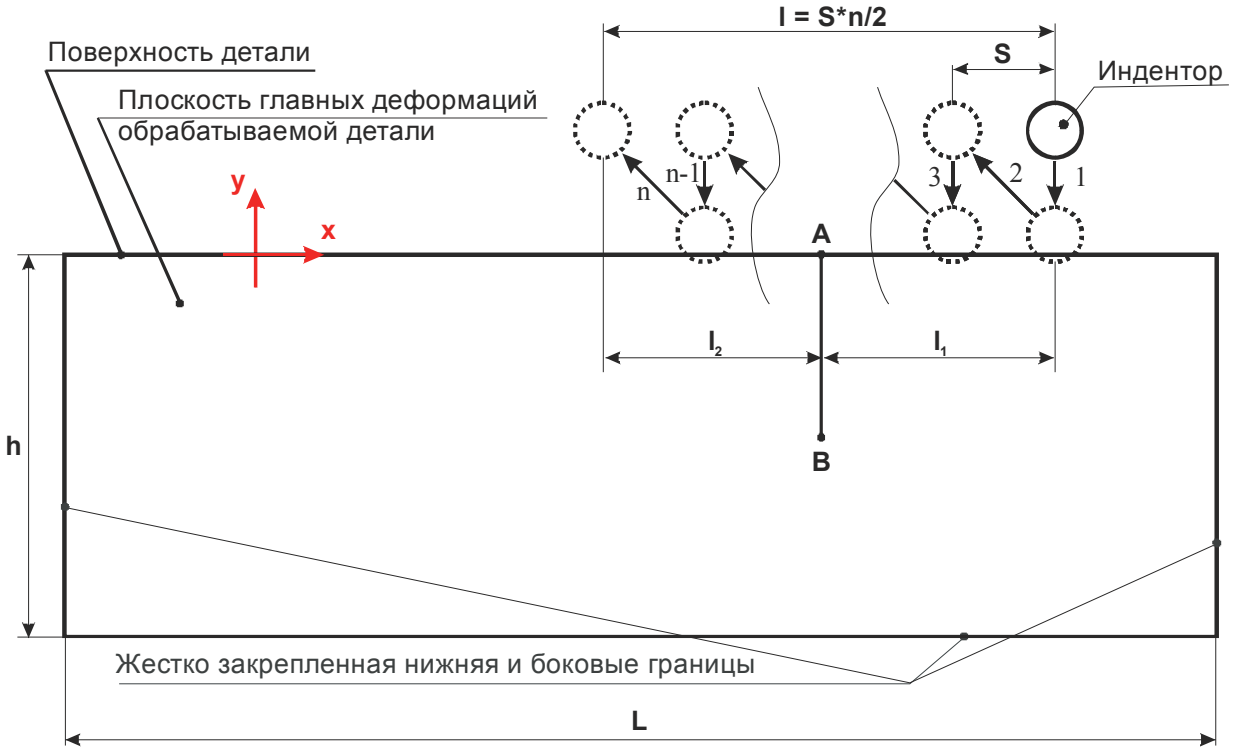



Рисунок 3 – Постановка задачи моделирования процесса обработки ППД

Таблица 1 – Параметры режима при моделировании обработки ППД

| Параметр режима | Обозначение | Ед. изм. | Значение в модели | Диапазон значений |
|---|---|---|---|---|
| Профильный радиус ролика | $R_{пр}$ | мм | **5** | 1,6-16 |
| Подача | $S$ | мм/об | **0,1** | 0,05-0,25 |
| Действительный натяг ролика | $h_д$ | мм | **0,05** | до 0,1 мм для стали 45 |

В исходном положении индентор находился относительно поверхности с зазором, равным 0,05 мм (рис. 3).

На 1-ом и любом последующем нечетном шаге моделирования осуществлялось нагружение – перемещение индентора в направлении поверхности на величину 0,1 мм. Таким образом, индентор внедрялся в поверхность на величину действительного натяга.

На 2-ом и любом последующем четном шаге моделирования осуществлялась разгрузка – отвод индентора от поверхности на величину 0,1 мм с его одновременным перемещением вдоль поверхности на величину подачи.

Всего было смоделировано 300 шагов – 150 шагов нагружения и 150 шагов разгрузки. При этом длина обработанной поверхности в представленной модели составила $l = S*n/2 = 15$ мм.

Основная идея моделирования трансформации НДС и ОН в ОД заключалась в следующем. Некоторое сечение ***AB*** моделируемого фрагмента расположено таким образом, что на 1-ом шаге нагружения оно еще не попадает в пространство ОД. В то же время на предпоследнем шаге нагружения это сечение уже покинуло пространство ОД. Расстояние $l_1$ в направлении подачи от стартового положения индентора до сечения ***AB*** составило 5 мм, расстояние $l_2$ в направлении подачи от сечения ***AB*** до конечного положения индентора составило 10 мм (рис. 3-4).

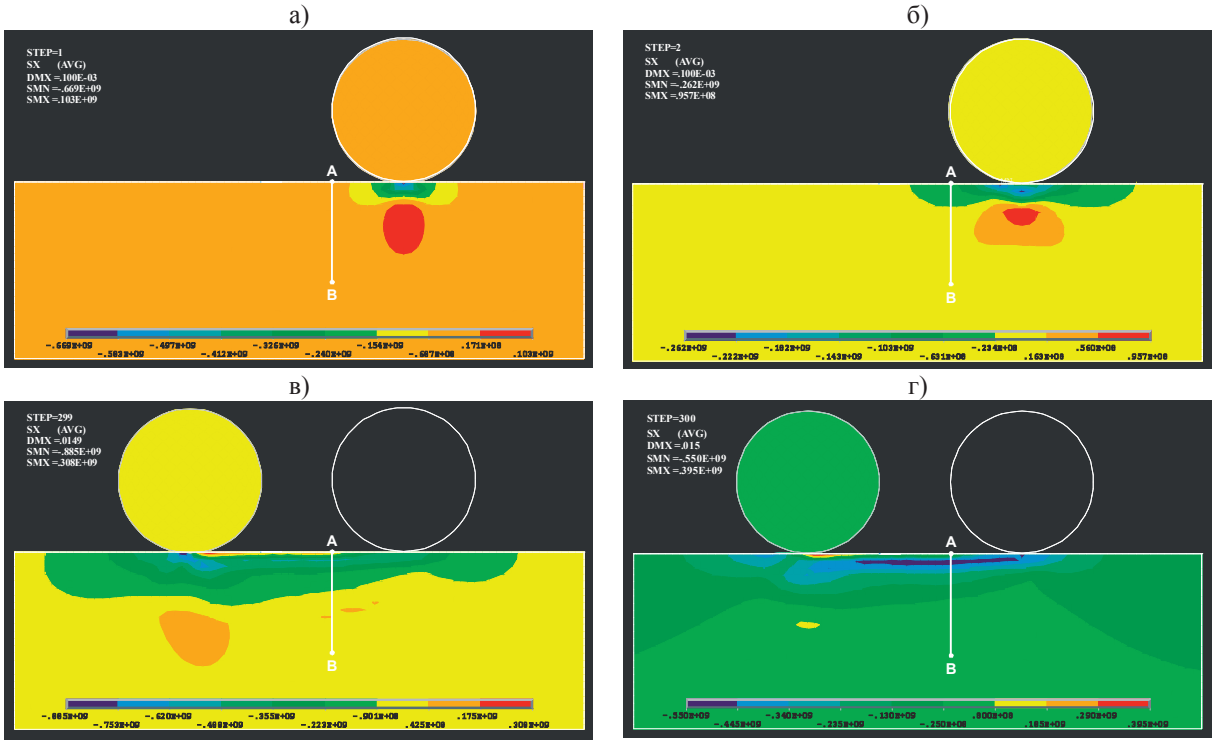



Рисунок 4 – Распределение осевых напряжений после моделирования: а) 1-го шага (нагружение); б) 2-го шага (разгрузка); в) 299-го шага (нагружение); г) 300-го шага (разгрузка)

Таким образом, в процессе реализации всех шагов моделирования указанное сечение проходит через пространство ОД и является сечением по глубине обработанного ПС, в котором произошло накопление деформаций, частичное исчерпание запаса пластичности и формирование тензора ОН с учетом изменяющихся свойств ПС. На рис. 4 в качестве примера представлено распределение осевых напряжений после 1-го, 2-го, 299-го и 300-го шагов нагружения. Отмечено сечение, в котором фиксируются параметры НДС на каждом шаге моделирования.

**Результаты и обсуждение**

После получения решения модели в выделенном сечении ***AB*** для каждого шага моделирования фиксировались следующие значения: координаты узлов в сечении, составляющие вектора смещений узлов сечения, компоненты тензора напряжений, компоненты тензора суммарной упруго-пластической деформации.

Расчетные значения накопленных параметров механического состояния по обрабатываемой поверхности (***y*** = 0 мм) представлены в табл. 3. При расчетах были приняты следующие параметры:

- угол деформации в окружном направлении $10^0$ (принят по данным В.М. Смелянского и В.Ю. Блюменштейна);

- частота вращения детали 300 об/мин;

Таким образом, время одного оборота детали составило 0,2 с. Поскольку принятый угол деформации (пространство ОД) в окружном направлении составил $10^0$, время одного цикла, за который происходит нагрузка и разгрузка ПС составило 0,0054 с. Было принято, что половину этого времени (0,0027 с) осуществляется нагружение и столько же - разгрузка ПС.

Таблица 3 –Расчетные значения накопленных параметров механического состояния по обрабатываемой поверхности (фрагмент)

| Шаг нагружения | y, мм | σ, МПа | T, МПа | П | $\Lambda_p$ | Компоненты скорости деформации, $с^{-1}$ | | | H, $с^{-1}$ | Λ | Ψ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | $\xi_x$ | $\xi_y$ | $\xi_{xy}$ | | | |
| 1 | 0 | -16,19 | 18,25 | -0,887 | 2,2858 | -5,81E-02 | 2,55E-02 | -1,95E-02 | 9,41E-02 | 0,0001 | 0,0001 |
| 2 | 0 | -22,95 | 27,75 | -0,827 | 2,1927 | -3,34E-02 | 1,11E-02 | -1,25E-03 | 4,64E-02 | 0,0003 | 0,0001 |
| 3 | 0 | -18,73 | 21,40 | -0,875 | 2,2673 | 2,30E-02 | -7,25E-03 | -2,11E-03 | 3,18E-02 | 0,0004 | 0,0002 |
| 4 | 0 | -22,53 | 27,27 | -0,826 | 2,1914 | -2,14E-02 | 6,53E-03 | 2,15E-03 | 2,95E-02 | 0,0005 | 0,0002 |

Отметим некоторые особенности распределения тензора ОН по глубине ПС после 300 шага моделирования (рис. 5):

1. Наибольшими сжимающими значениями напряжений (до 560 МПа) характеризуется осевой компонент $\sigma_x$, значения сжимающих напряжений которого приближаются к пределу текучести упрочненного металла. Этот факт является благоприятным по причине существенного влияния компонента $\sigma_x$ на циклическую долговечность детали при ее эксплуатационном (усталостном) нагружении по схеме изгиба с вращением. Сжимающие напряжения $\sigma_x$ на поверхности и в близлежащем слое, суммируясь с растягивающими эксплуатационными напряжениями, взаимно компенсируют друг друга, снижая тем самым тензор действующих напряжений.

Полученные значения соответствуют данным, экспериментально полученным В.М. Смелянским и Ч.Н. Абсаром, по результатам исследований которых величина осевых ОН при ППД достигает -800 МПа, а окружных напряжений ($\sigma_z$ на рис. 14) – до -400 МПа [7-8].

2. Осевой компонент обнаруживает экстремум сжимающих напряжений, расположенный на глубине около 0,5 мм под поверхностью детали.

Представленная картина формирования ОН хорошо согласуется с результатами Д.Д. Папшева, полученными для обработки ППД шариком. Автор подчеркивает возможность образования экстремума сжимающих ОН как на поверхности детали, так и на некоторой глубине [9].

3. Компонент $\sigma_y$ характеризуется значительно меньшими, чем $\sigma_x$ значениями при тех же глубинах распространения. На поверхности и в подповерхностном слое $\sigma_y$ принимает преимущественно отрицательные значения, не превышающие –100 МПа. Ему также свойственны меньшие перепады, как в область растягивающих, так и в область сжимающих значений. Это соответствует результатам исследований В.М. Смелянского, согласно которым, радиальный компонент ОН для ППД на поверхности имеет нулевые значения. Небольшие значения $\sigma_y$, характерные для тензора ОН при ППД, не являются существенным недостатком в силу незначительного влияния этого компонента на циклическую долговечность детали [7].

4. Тензор ОН характеризуется значительной глубиной распространения сжимающих напряжений (до ***h*** = 4 мм), а также существенной глубиной распространения до точки затухания (***h*** = 7 мм).

В целом полученная картина хорошо согласуется с аналитическими и экспериментальными результатами, полученными авторами ранних работ.

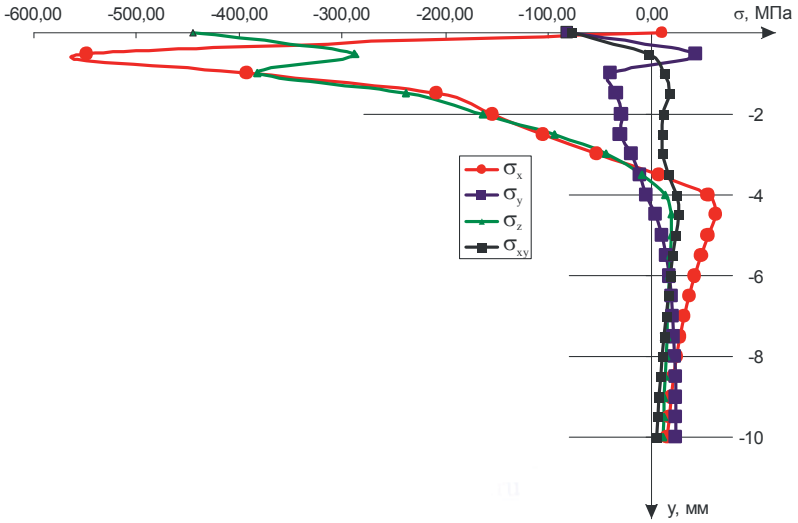



Рисунок 5 – Распределение компонент тензора остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после 300-го шага моделирования

## Список литературы

1. *Иванов, С. И.* Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов // Пробл. прочности. - 1976. - №5. - С. 25-27.
2. *Махалов, М.С.* Моделирование остаточных напряжений на стадиях жизненного цикла изделий / М. С. Махалов, В.Ю. Блюменштейн // Вестник машиностроения. – М: Машиностроение, 2014. – №12. – С. 21-25.
3. *Блюменштейн В. Ю.* Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.: ил.
4. *Биргер, И. А.* Остаточные напряжения / И. А. Биргер. - М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. - 232 с.: ил.
5. *Сторожев М. В.* Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. - М.: Машиностроение, 1977. - 423 с.
6. *Овсеенко А. Н.* Формирование состояния поверхностного слоя деталей машин технологическими методами / А. Н. Овсеенко, М. М. Gajek, В. И. Серебряков. – Opole: Politechnika Opolska, 2001. – 228 с.
7. *Смелянский В. М.* Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.: ил.
8. *Чоудхури Мд. Н. Абсар*. Разработка расчетной модели формирования остаточных напряжений и методики их технологического обеспечения при обработке деталей обкатыванием и выглаживанием : дис. … канд. техн. наук : 05.02.08. - М., 1988. – 200 с.
9. *Папшев Д. Д.* Упрочнение деталей обкаткой шариками / Д. Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1968. – 132 с.

## THE SURFACE LAYER RESIDUAL STRESS FORMING INHERITED MODEL IN SURFACE PLASTIC DEFORMATION PROCESS

**Mahalov M. S.**, C. Sc. (Engineering), Associate Professor, E-mail: maxim_ste@mail.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Abstract:** The residual stresses (RS) research and computational algorithms creation in complex types of loading on the product lifecycle stages relevance is shown. The RS forming finite element model at surface plastic deformation strengthening machining, including technological inheritance effect, is presented. A model feature is the production previous stages obtained transformation properties consideration, as well as these properties evolution during metal particles displacement through the deformation space in the present loading step.

**Keywords:** residual stresses, technological inheritance, surface layer, hardening treatment, surface plastic deformation.

**УДК 621.921.27**

# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОРОШКОВ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА, ПОЛУЧЕННЫХ В ИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ, ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ

*В. И. МАРУСИНА, канд. техн. наук, доцент,*
*Х. М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор*
*(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Рахимянов Х.М. - 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: kharis51@mail.ru

**Аннотация:** В настоящей статье рассмотрено влияние отжига частиц карбида вольфрама, полученных в искровом разряде, на их эксплуатационные свойства. Исследована абразивная способность различных порошков, включая ВК8 промышленной поставки, ВК8 диспергированный в искровом разряде, β-WC отожженный, α- WC промышленной поставки. Установлено, что отжиг карбида вольфрама снижает абразивную способность порошка, тем не менее, она превосходит показатели порошка α- WC.

Изучение микротвердости, износостойкости покрытий на основе синтезированных в искровом разряде порошков показали на возможность их использования в технологии нанесения покрытий со спеканием.

**Ключевые слова:** искровой разряд, карбид вольфрама, порошки, абразивная способность, покрытия, износостойкость, микротвердость.

**Введение**

Создание, развитие и совершенствование технологий нанесения различного рода износостойких покрытий является актуальной задачей как для повышения эксплуатационных характеристик деталей машин и инструментов, так и внедрения ресурсо- и энергосберегающих безотходных технологий. Решение первой задачи достигается при использовании порошковых материалов с повышенными физико-механическими свойствами, в частности, карбидов вольфрама.

Дефицит вольфрама в природе требует экономного его расходования в промышленности и, в первую очередь, совершенствования технологии переработки отходов для организации производства на основе замкнутого цикла. Так исходным сырьем для получения порошковых материалов могут служить отходы переходных металлов и изношенных пластинок твердого сплава ВК, а технологическим методом их получения - электроискровый синтез.

Исследованиями авторов [1-7] установлено, что порошки карбида вольфрама, полученные электроискровым методом, отличаются от стандартных промышленных как формой, размерами, морфологией поверхностей частиц, так и повышенными свойствами - абразивной способностью, прочностью на сжатие и микротвердостью. В работах [8, 9] даны рекомендации по составу рабочей углеродосодержащей жидкости, влияющей на состав и свойства порошков карбида вольфрама. Так при электроэрозионном диспергировании твердого сплава ВК в индустриальном масле, получаемые порошки карбида представляют собой в основном смесь β- WC и $W_2C$. При этом удельная поверхность порошка составляет 68,4 $м^2/г$. Частички порошка имеют сферическую и неправильную геометрическую форму.

Кубическая модификация карбида вольфрама является метастабильной и полный фазовый переход β α происходит при $900^0$С. Принимая во внимание то, что при использовании порошковых материалов для покрытий необходим нагрев для их спекания, представляет интерес влияние высокотемпературного нагрева на физико-механические свойства порошков, полученных в искровом разряде.

**Методика экспериментальных исследований**

Получение порошков карбида вольфрама в искровом разряде из отходов твердого сплава ВК8 проводили с использованием электроискрового станка мод. 1Б723. В качестве углеродосодержащей рабочей жидкости применялось масло индустриальное марки 20. Изучение абразивной способности порошков основывалось на ультразвуковой размерной обработке стекла на ультразвуковом станке мод. 4772 при различных значениях статической нагрузки.

Для исследования износостойкости покрытий разработана и изготовлена специальная установка для испытаний в условиях сухого трения твердосплавным индентором. Изучение микротвердости покрытий проводили на микротвердомере модели ПМТ-3М при нагрузке 0,2 Н.

**Результаты и обсуждение**

Экспериментально установлено, что в результате отжига при $900^0$C в вакууме удельная поверхность отожженного порошка карбида вольфрама снижается до 24,8 $м^2/г$, а количество сферических частиц размерами до 2,5 мкм увеличивается по сравнению с исходным состоянием, а частиц неправильной геометрической формы - уменьшается.

Для оценки абразивной способности порошка использовалась схема ультразвуковой размерной обработки, в основе которой лежат процессы микровыкалывания обрабатываемого хрупкого материала абразивными частицами. Степень разрушения последних в значительной мере зависит от геометрии частиц порошка, входящих в состав суспензии. Как отмечалось в работе [3], указанный метод испытания позволяет оценить микропорошки β- WC по сопротивлению контактным напряжениям сжатия (степени дробления частиц). Это связано с тем, что абразивные зерна при ультразвуковой размерной обработке испытывают, в основном, этот вид нагружения. В тоже время съем обрабатываемого материала пропорционален микротвердости используемых при ультразвуковой обработке материалов.

Так абразивная способность при ультразвуковой размерной обработке стекла у порошков, полученных электроэрозией твердосплавных пластин ВК в индустриальном масле, возросла незначительно (в 1,2 раза) по сравнению с промышленным порошком (рис.1, кривые 1, 2). В тоже время сопротивление контактным напряжением сжатия заметно повысилось, так как удельная поверхность промышленного порошка ВК8 после ультразвуковых испытаний увеличилась в 5 раз, а у синтезированного в искровом разряде - даже несколько снизилась (см. таблицу).

Таблица – Удельная поверхность порошков, $м^2/г$ до и после ультразвуковых испытаний

| Микропорошок | До испытаний | После испытаний |
|---|---|---|
| ВК8 промышленный | 1,1 | 5,1 |
| ВК8, диспергированный в искровом разряде | 68,4 | 50,5 |
| Отожженный β-WC | 24,8 | 31,1 |
| α-WC промышленный | 1,1 | 7,2 |

Абразивная способность отожженного порошка β- WC ниже, чем у исходного, но выше, чем у α- WC (рис. 1, кривые 3, 4, 5). Измерения удельной поверхности до и после ультразвуковых испытаний показали, что его сопротивление контактным напряжениям сжатия, также выше, чем у α- WC, так как удельная поверхность после испытаний у синтезированных отожженных порошков выросла лишь в 1,25 раза, а у промышленных в 7 раз (см. таблицу).

Таким образом, результаты испытаний позволяют расширить диапазон возможного применения синтезированных искровым способом порошков карбида вольфрама из отходов производства. Например, их можно использовать как компоненты смесей при нанесении износостойких покрытий различными методами на поверхности деталей машин и инструментов.

Из результатов исследований очевидно, что для сохранения физико-механических свойств модификации β- WC порошка его целесообразно применять в покрытиях, не требующих последующего спекания (комбинированные электрохимические покрытия (КЭП), химические покрытия). Эти покрытия характеризуются тем, что частицы β- WC после осаждения заращиваются кобальтом, восстановленным из электролита на катоде в результате химических реакций.

Для оценки работоспособности КЭП, полученных с использованием синтезированных порошков, проводили исследования микротвердости покрытия и его износостойкости. Максимальная микротвердость у КЭП на основе β-WC+Co составила 7 ГПа, а на основе α-WC+Co - 6 ГПа, что объясняется невысокой концентрацией карбидной фазы и значительной неравномерностью распределения частиц β- WC в покрытии. В тоже время сравнение покрытий показало, что износостойкость покрытия на базе порошков β- WC в 2 раза выше, чем α- WC (рис. 2) при одних и тех же условиях их создания и имеющих идентичную неравномерность карбидных частиц.

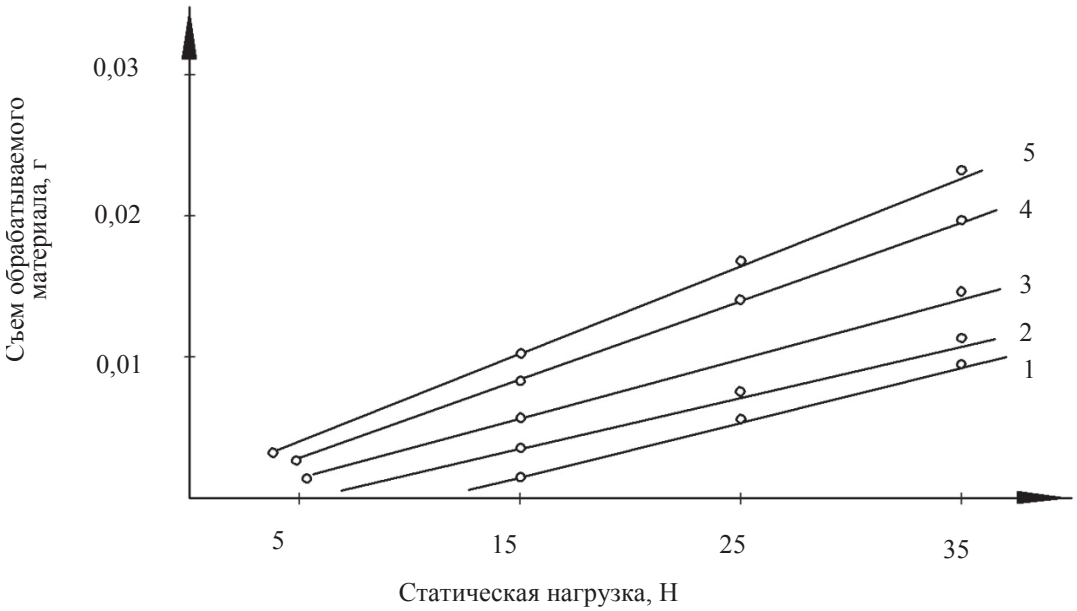



Рисунок 1 – Зависимость съема стекла от статической нагрузки при ультразвуковой размерной обработке для порошков:
1 – ВК8 промышленный; 2 – ВК8, диспергированный в искровом разряде;
3 – α-WC; 4 – отожженный порошок β-WC; 5 – β-WC.

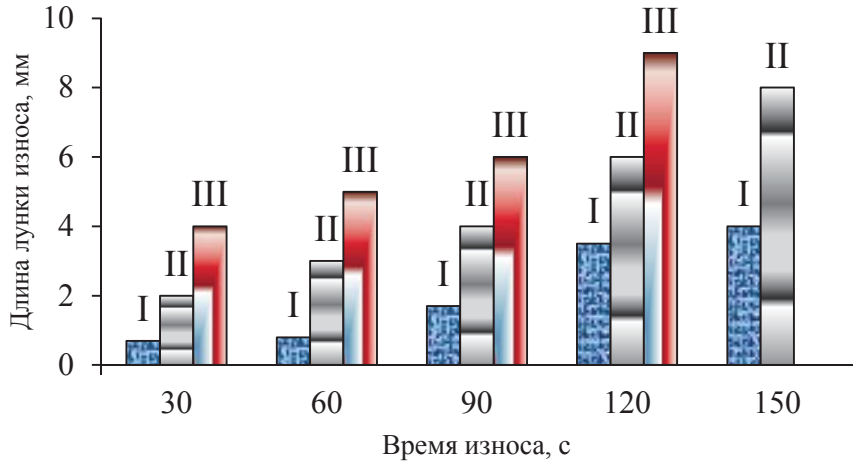



Рисунок 2 – Зависимость износостойкости КЭП от времени испытаний:
I – β-WC + Co; II – α-WC + Co; III – Co

Как показали исследования, порошки β- WC после отжига частично сохраняют свои повышенные физико-механические свойства, то представляется возможным их использование для нанесения покрытий с использованием электрофоретического осаждения, предполагающего последующее спекание. Экспериментальными исследованиями показано, что при использовании специального состава суспензии, разработанного для электрофоретического осаждения порошков карбида вольфрама, синтезированных электроэрозионным методом, было достигнуто формирование равномерных покрытий с интегральной микротвердостью 10-11 ГПа, а на частицах β-WC - до 28 ГПа. Износостойкость покрытий на основе β-WC+Co в 1,2 раза выше по сравнению с покрытиями на основе α-WC+Co, полученных в идентичных условиях.

**Выводы**

Таким образом, экспериментально доказано, что порошки карбида вольфрама, синтезированные в искровом разряде, после отжига частично сохраняют повышенные эксплуатационные свойства, что предоставляет возможность их использования в технологии нанесения покрытий с операцией спекания. Электрофоретическое осаждение порошков карбида вольфрама позволило получить покрытия с высокой износостойкостью.

## Список литературы

1. *Филимоненко В.Н.* Получение карбидов вольфрама в искровом разряде / В.Н. Филимоненко, В.И. Марусина // Электронная обработка материалов. – 1980 - № 4. С. 47-50.

2. *Марусина В.И.* Взаимосвязь теплового режима искрового разряда с формой и диапазоном распределения частиц микропорошка карбида вольфрама по размерам / В.И. Марусина, В.Н. Филимоненко // Порошковая металлургия. – 1984 - № 6. С. 10-14.

3. *Марусина В.И.* О некоторых физико-механических свойствах карбида вольфрама кубической модификации / В.И. Марусина, Б.М. Крейчман, В.Н. Филимоненко // Сверхтвердые материалы. – 1981 - № 6. – С. 3-5.

4. *Марусина В.И.* Фазовый и гранулометрический состав карбидов, образующихся при электроэрозионной обработке вольфрама / В.И. Марусина, Г.А. Исхакова, Х.М. Рахимянов // Порошковая металлургия. – 1992 - № 10. С. 61-64.

5. *Марусина В.И.* Структура и фазовый состав диспергированного электроискровым методом сплава WC-Co / В.И. Марусина, Г.А. Исхакова, В.Н. Филимоненко, В.И. Синдеев // Порошковая металлургия. – 1991 - № 5. – С. 75-79.

6. *Исхакова Г.А.* Структурное и фазовое состояние частиц карбида вольфрама, синтезированных в искровом разряде / Г.А. Исхакова, В.И. Марусина // Порошковая металлургия. – 1989 - № 10. – С. 13-18.

7. *Исхакова Г.А.* Определение микротвердости частиц карбида вольфрама, полученных в искровом разряде / Г.А. Исхакова, В.И. Марусина, Х.М. Рахимянов // Порошковая металлургия. – 1987 - № 10. – С. 87-89.

8. *Исхакова Г.А.* Свойства порошков карбида вольфрама, синтезированных электроискровым методом в различных углеводородах / Г.А. Исхакова, В.И. Марусина // Физика и химия обработки материалов. – 1993 - № 5. – С. 85-93.

9. *Марусина В.И.* Фазовый состав и состояние поверхности частиц порошка карбида вольфрама, полученного при электроэрозии вольфрама в среде продуктов перегонки нефти / В.И. Марусина, И.В. Ерошкина // Физика и химия обработки материалов. – 1997 - № 4. – С. 52-57.

## PROSPECTS OF USING TUNGSTEN CARBIDE POWDERS OBTAINED IN THE SPARK DISCHARGE FOR THE FORMATION OF COATINGS

**Marusina V. I.,** C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: marusina@corp.nstu.ru
**Rakhimyanov Kh. M.,** D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

**Abstract:** This article examines the effect of annealing tungsten carbide particles obtained in the spark discharge their operational properties. Investigated the ability of different abrasive powders, including VK8 industrial supplies VK8 dispersed in a spark discharge, β-WC annealed, α-WC industrial supplies. It found that annealing of tungsten carbide powder reduces its abrasiveness, however, it is superior indicators powder α-WC. The study of microhardness, wear-resistant coatings based on synthesized in the spark discharge powders showed the possibility of their use in coating technology with sintering.

**Keywords:** spark discharge, tungsten carbide, powders, abrasiveness, coatings, wear resistance, microhardness.

**УДК 621.762:621.79:536.2**

# ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МОДИФИЦИРОВАННЫХ СТРУКТУР

*Д. В. МИНЬКО, канд. техн. наук, доцент,*
*К. Е. БЕЛЯВИН, доктор техн. наук, профессор,*
*В. К. ШЕЛЕГ, чл.-корр. НАН Беларуси, доктор техн. наук, профессор*

Белорусский национальный технический университет
Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65
dz-m@tut.by

**Аннотация:** Рассмотрены наиболее эффективные методы повышения прочности конструкционных материалов при сохранении их пластичности. Показано, что задача повышения прочности изделий путем создания объемной или поверхностной ультра- и нанокристаллической структуры материала в промышленных масштабах до сих пор до конца не решена. Решение этой задачи может основываться на использовании электрофизических методов высокоэнергетического воздействия, получивших в последние годы широкое развитие. Рассмотрены перспективные импульсные электрофизические методы – электроимпульсное спекание и импульсно-плазменное модифицирование, описаны их принципы и области наиболее эффективного применения. Представлены экспериментальные данные и примеры использования полученных композиционных материалов и модифицированных структур.

**Ключевые слова:** композиционный материал, высоковольтный разряд, плазма, модифицированная структура

**Введение**

Композиционные материалы (КМ), имеющие неоднородную структуру и состоящие, главным образом, из физически и химически разнородных веществ, создаваемые с целью достижения свойств, недоступных для однородных материалов, получают все большее распространение в технике. Расширение работ по созданию КМ с улучшенными функциональными свойствами, к которым можно отнести также элементы деталей с модифицированной структурой, привело к разработке новых уникальных технологий. В основу большинства таких технологий положены методы, реализуемые на основе использования энергии электрического тока или специфических физических явлений, создаваемых электрической энергией [1, 2].

Наиболее эффективным методом повышения прочности конструкционных материалов считается создание в объеме или на поверхности материала ультрамелкого зерна с развитой ячеистой субструктурой. Высокодисперсное состояние в реальных изделиях достигается применением наследственно мелкозернистых сталей, различными методами интенсивной пластической деформации [3-5], лазерной либо ионно-плазменной обработкой [6]. При этом задача повышения прочности изделий путем создания объемной или поверхностной ультра- и нанокристаллической структуры в промышленных масштабах окончательно не решена. Решение этой задачи может основываться на использовании электрофизических методов высокоэнергетического воздействия, получивших в последние годы значительное развитие.

**Методика экспериментального исследования**

Метод электроимпульсного спекания (ЭИС) [7] основан на пропускании через находящийся в диэлектрической матрице 7 порошок 6 (рисунок 1), содержащий электропроводящие компоненты, мощного ($10^5$-$10^6$ кА/м$^2$) кратковременного ($10^{-5}$-$10^{-2}$ с) импульса тока, создаваемого емкостным генератором 3. Ток подводится через электроды-пуансоны 8 и 9. При этом происходит локальный разогрев и соединение частиц порошка в зоне их контакта. Высокая скорость нагрева-охлаждения при ЭИС (до $10^8$ К/с) способствует возникновению и сохранению микрокристаллических и аморфизированных структур в объеме материала [8].

Метод импульсно-плазменного модифицирования (ИПМ), разработан для поверхностной обработки материалов и покрытий с различной геометрией поверхности с целью управления структурой, фазовым составом, физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Принцип ИПМ заключается в ускорении потока стационарной плазмы с помощью импульсных высоковольтных ($10^3$-$10^4$ В) разрядов с регулируемой частотой следования (0,1-10 Гц) до сверхзвуковых скоростей (рисунок 2). В формирующихся таким образом импульсных плазменных пучках плотность тока достигает

значений порядка $10^3$-$10^4$ кА/м$^2$, а локальная температура плазмы может достигать значений ~$10^4$ К [2]

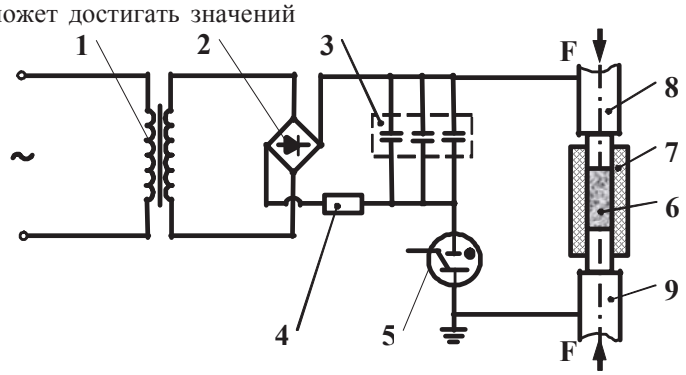



Рисунок 1 – Схема установки ЭИС: 1 – повышающий трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – емкостные накопители энергии; 4 – ограничивающий резистор; 5 – игнитронный разрядник; 6 – порошок; 7 – диэлектрическая матрица; 8 – верхний электрод-пуансон; 9 – нижний электрод-пуансон; F – усилие прессования

Микроструктуру экспериментальных образцов исследовали на металлографическом микроскопе Polivar (Австрия) и электронном сканирующем микроскопе MIRA (Чехия), микротвердость – с помощью микротвердомера Micromet (Германия), рентгенофазовый анализ проводили с помощью дифрактометра общего назначения «Дрон 3», испытания на износостойкость – на машине трения МТ-2.

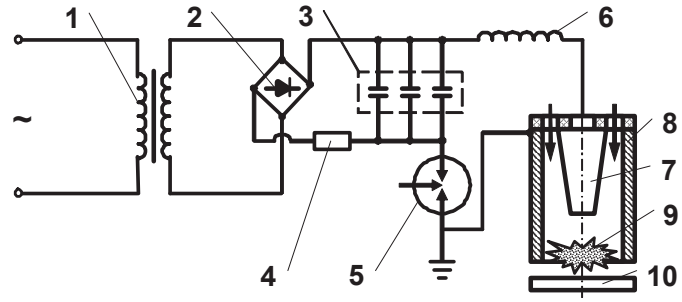



Рисунок 2 –Схема установки ИПМ: 1 – повышающий трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – емкостный накопитель энергии; 4 – ограничивающий резистор; 5 – разрядник; 6 – катушка индуктивности; 7 – катод; 8 – анод; 9 – плазменный пучок; 10 – обрабатываемое изделие

**Результаты и обсуждение**

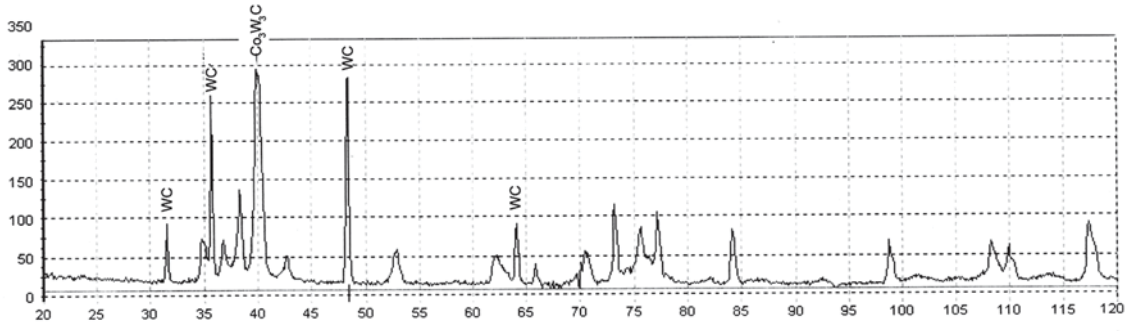
Система WC-Co является примером систем, в которых сплав формируется в результате спекания в присутствии жидкой фазы, образующейся на основе легкоплавкого компонента (кобальта). Жидкая фаза по перитектической реакции с $W_2C$ образует так называемую η-фазу, которая является неустойчивым соединением, образующимся при быстром охлаждении и разлагающимся при нагревании. Присутствие η-фазы в промышленных твердых сплавах приводит к значительному снижению прочности на изгиб (по сравнению с двухфазным сплавом – почти в два раза) [9].

Проведенные исследования показали, что при ЭИС твердого сплава не происходит перекристаллизации карбида вольфрама через жидкую фазу (кобальт), однако наблюдается разложение η-фазы, особенно в присутствии дополнительного углерода.

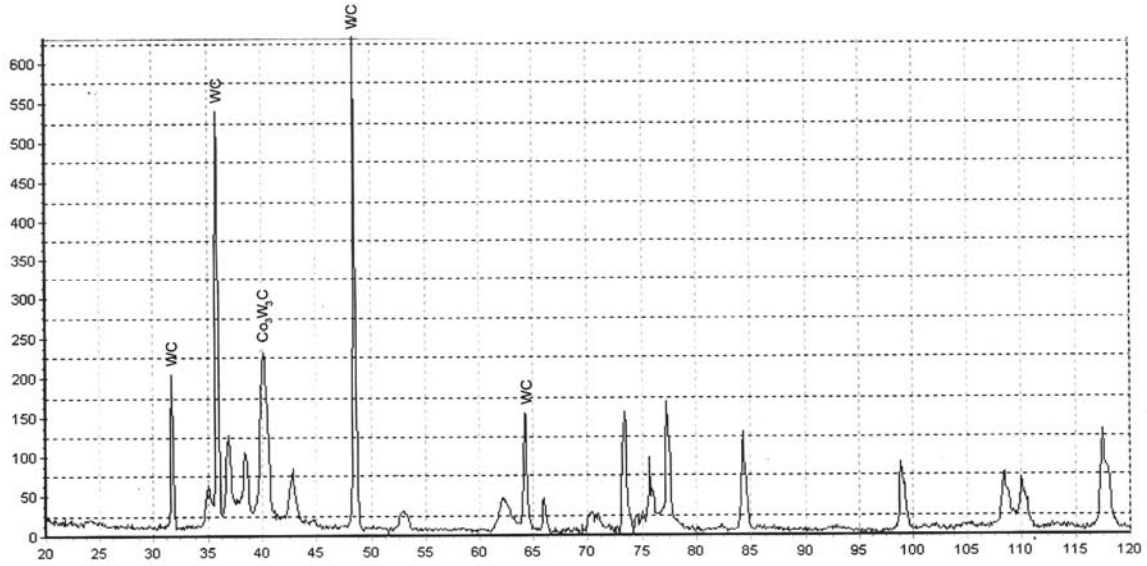
Анализ полученных микроструктур позволил установить, что в процессе ЭИС экспериментальных образцов твердого сплава марки ВК8 происходит некоторое количественное увеличение фазы WC и уменьшение η-фазы. При этом размер зерен фазы WC до и после ЭИС практически не меняется и составляет 1,5-3,0 мкм.

Результаты рентгенофазового анализа экспериментальных образцов до и после ЭИС (рисунок 3) подтвердили, что электроимпульсная обработка позволяет уменьшить количество η-фазы за счет ее разложения с переходом в двухфазную систему WC-$Co_3W_3C$. Результаты количественного рентгенофазового анализа показывают, что доля хрупкой η-фазы после ЭИС уменьшилась примерно в четыре раза.

Результаты испытания на износостойкость КМ, полученных из порошковой композиции ВК8 нанесенной на стальную подложку с использованием ЭИС. показали, что применение ЭИС позволяет повысить износостойкость на 10-13 %.




а




б

Рисунок 3 – Результаты рентгенофазового анализа экспериментальных образцов ВК8 до (а) и после ЭИС (б)

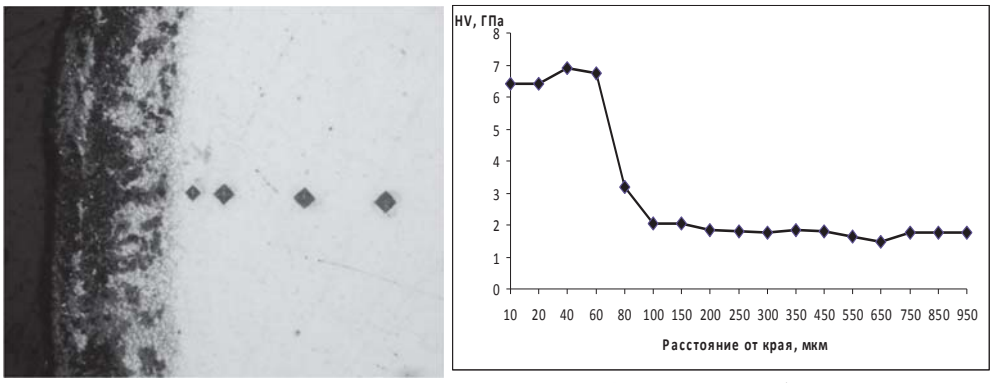
На основе метода ЭИС разработана технология получения износостойких порошковых покрытий на внутренних поверхностях стальных втулок. При этом возможно нанесение слоев переменной толщины с высокой точностью и чистотой поверхности. Область применения таких КМ – различные конструкции форсунок и распылителей газов, пара, жидкостей (рисунок 4). Композиционные втулки используются также для правки проволоки в металлообработке. Технология применяется для изготовления, восстановления и упрочнения деталей.

Рисунок 4 – Сменные износостойкие форсунки для подачи технической воды под высоким давлением

Экспериментальные исследования метода ИПМ проводили на образцах из стали 45 предварительно термообработанных до 44-46 HRC и подвергнутых полированию до Ra0,4. Исследования показали, что после ИПМ поверхность образцов приобретала темно-серый оттенок, но параметр шероховатости не изменялся.

Результаты измерений микротвердости образцов в перпендикулярном поверхности направлении показали (рисунок 5), что после

ИПМ микротвердость в тонком (~20 мкм) поверхностном слое возрастала в 2-3 раза (до 6-7 ГПа) и по мере удаления от поверхности монотонно снижалась до 1,7-1,8 ГПа на глубине 100 мкм от поверхности.




а б

Рисунок 5 – Изменение (а, х50) и распределение (б) микротвердости в направлении от поверхности к центру поперечного сечения образца после ИПМ

Результаты металлографических исследований образцов из стали 45, полученные с использованием методик оптической и электронной микроскопии, показывают, что после ИПМ в тонких поверхностных слоях материала возникают мартенситные превращения, увеличивающие микротвердость в 2-3 раза на глубину до 20 мкм, в то время как микротвердость внутренней части материала остается практически неизменной.

Особенностью ИПМ является также то, что обработке можно подвергать предварительно объемно-закаленные детали со сложным профилем и высокой чистотой поверхности. В практических целях полученные результаты можно использовать при разработке технологий упрочнения поверхностей изделий, работающих в условиях повышенного абразивного износа.

**Выводы**

Проведен комплекс экспериментальных исследований, позволивших разработать новые технологические процессы получения композиционных и модифицированных структур материалов на основе вольфрамсодержащих твердых сплавов, углеродистых и инструментальных сталей с использованием методов ЭИС и ИПМ.

Исследования процессов упрочнения элементов деталей различного функционального назначения, проводимые в Белорусском национальном техническом университете (г. Минск, Беларусь), разрабатываемые математические и физические модели процессов структурообразования в упрочняемом слое обрабатываемых материалов, позволяют надеяться на успешное решение поставленной задачи по созданию технологии получения наноструктурированных КМ с повышенным комплексом эксплуатационных свойств импульсными методами электрофизического воздействия.

Появление доступных и малогабаритных источников импульсной энергии (высоковольтных электрических, инверторных), способных создавать направленные высококонцентрированные энергетические потоки с малой длительностью пульсации, открывает новые возможности разработки и создания новых устройств для импульсной электрофизической обработки протяженных поверхностей материалов.

## Список литературы

1. *Белявин, К.Е.* Моделирование процесса электроимпульсного спекания металлических порошков / К.Е.Белявин, Д.В.Минько, О.О.Кузнечик // Инженерно-физический журнал. –2004. –Т.77. -№3. –С.136-143.

2. Исследование особенностей генерации импульсной плазмы в воздухе при атмосферном давлении / Ю.А.Чивель, О.О.Кузнечик, Д.В.Минько, И.С.Никончук, А.Н.Чумаков, К.Е.Белявин // Инженерно-физический журнал. –2011.–Т. 84. -№5. –С.1028-1033.

3. *Маркушев, М.В.* К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов / М.В.Маркушев // Письма о материалах. -2011. -Т.1. –С.36-42.

4. *Кожевникова, Г.В.* Построение эпюр контактных напряжений на границе инструмент–заготовка при поперечной прокатке / Г.В.Кожевникова // Трение и износ. –2005. –Т. 26. -№ 1. –С. 94–99.

5. *Щукин, В.Я.* Новое в поперечно-клиновой прокатке / В.Я.Щукин, Г.В.Кожевникова, А.О.Рудович // Кузнечно-штамповочное производство. –1999. –№ 3. – С.35–37.

6. *Панин, В.Е.*, Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктур-

ных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов / В.Е.Панин, В.П.Сергеев, А.В.Панин, Ю.И.Почивалов // ФММ. –2007. –Т.104. -№ 6. –С.650-660.

7. *Белявин, К.Е.* Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов / К.Е.Белявин, В.В.Мазюк, Д.В.Минько, В.К.Шелег. -Минск: ООО «Ремико», 1997. – 180 с.

8. *Hedvig, R.* Toward quantitative deuterium analysis with laser-induced breakdown spectroscopy using atmospheric-pressure helium gas / R.Hedvig, Z.S.Lie, K.H.Kurniawan, A.N.Chumakov, K.Kagawa, May On Tjia // Journal of Applied Physics -2010. -Vol.107. -No.2, -P.023301 1-5.

9. *Третьяков, В.И.* Основы металловедения и технология производства спеченных твердых сплавов // В.И. Третьяков. -М., Металлургия, 1976. 283 с.

## PULSE ELECTROPHYSICAL METHODS OF CREATING THE COMPOSITE MATERIALS AND MODIFIED STRUCTURES

**Minko D. V.**, C.Sc. (Engineering), Associate Professor,
**Belyavin K. E.**, D.Sc. (Engineering), Professor,
**Sheleg V. K.**, Corresponding Member of NAS of Belarus, D.Sc. (Engineering), Professor

Belarusian National Technical University, Nezavisimosty Ave., 65, Minsk, 220013, Belarus,
dz-m@tut.by

**Abstract:** The most effective methods of increasing the constructional materials strength enabling preserving its plasticity are considered. It is shown that the problem of increasing the products strength by creating the material's volume or surface ultra-and nanocrystalline structures in production quantities is not solved up to the end till now. The solution of this problem can be based on the use of high-energy exposure electrophysical methods, which have become widespread for the last years. The most perspective pulse electrophysical methods, such as Electric Discharge Sintering and pulse-plasmic modification are considered, their principles and areas of the most effective application are described. Experimental data and examples of the produced composite materials and modified structures use are presented. It is shown that creation of easily available and small-sized pulse energy sources, capable to create directed highly concentrated energy flows, opens new possibilities for working out and creating the devices for the extended surfaces of materials pulse electrophysical processing.

**Keywords:** composite material, high-voltage discharge, plasma, modified structure.

**УДК 621.793.71**

# ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

*О. Г. ДЕВОЙНО[1], доктор техн. наук, профессор,*
*В. В. ОКОВИТЫЙ[1], аспирант*
(*[1]БНТУ, г. Минск, Беларусь*)

Девойно О.Г. - 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65,
Белорусский национальный технический университет
e-mail: scvdmed@bntu.by

**Аннотация:** В работе исследованы процессы лазерной обработки плазменных покрытий на основе диоксида циркония. Высокая термостойкость теплозащитных покрытий (ТЗП) зависит от процессов, протекающих на границе между металлическим и керамическим слоями покрытия. Лазерное воздействие на образцы с ТЗП приводит к изменению структуры оксидного слоя $ZrO_2$-$Y_2O_3$. При этом его исходная поверхность, характеризующаяся развитым рельефом в результате обработки существенно выравнивается, оно растрескивается, разделяясь на фрагменты. Условия лазерной обработки представляют собой высокоскоростной тепловой удар с последующим быстрым охлаждением поверхности, в результате создаются значительные термические напряжения, которые, очевидно, и являются причиной фрагментации поверхности. В покрытии до обработки лазером образуется 6,6% моноклинной модификации, остальное практически тетрагональный диоксид. После обработки импульсным лазером в покрытии образуется сильно измельченная структура, исчезает моноклинная модификация $ZrO_2$ фактически получается 100% тетрагональная модификация.

**Ключевые слова**: плазменные покрытия, термостойкость теплозащитных покрытий, лазерное воздействие, граница металл-керамика, модификации диоксида циркония.

**Введение.** Стойкость плазменных покрытий типа Me-Cr-Al-Y/$ZrO_2$-$Y_2O_3$, применяемых в качестве ТЗП для защиты лопаток газотурбинных двигателей в условиях частых теплосмен, ограничивается скалыванием внешнего керамического слоя. Структурные и микрорентгеноспектральные исследования показали, что в результате термоциклирования внешняя атмосфера, благодаря пористой структуре керамического слоя покрытия, проникает к поверхности нижнего металлического покрытия, вызывая его окисление [1-3]. В результате на границе металл-керамика формируется слой $Al_2O_3$, изменяющий напряженное состояние покрытия, что приводит к снижению защитных свойств. Таким образом, высокая термостойкость теплозащитных покрытий зависит от процессов, протекающих на границе между металлическим и керамическим слоями покрытия. Лазерное воздействие на образцы с ТЗП приводит к изменению структуры оксидного слоя $ZrO_2$-$Y_2O_3$. При этом его исходная поверхность, характеризующаяся развитым рельефом в результате обработки существенно выравнивается , оно растрескивается, разделяясь на фрагменты. Так как оксидное покрытие обладает низкой теплопроводностью, а время воздействия лазера порядка $10^{-3}$ сек, тепловой поток не успевает распространиться на большую глубину[4-6]. В результате с поверхности покрытие приобретает вид застывшего расплава.

**Теория.** Условия лазерной обработки представляют собой высокоскоростной тепловой удар с последующим быстрым охлаждением поверхности, в результате создаются значительные термические напряжения, которые, очевидно, и являются причиной фрагментации поверхности. Как показали исследования, ширина возникающих при обработке импульсным $CO_2$ лазером с длиной волны 9,25 мкм и плотностью энергии импульса от 800 до 2000 кДж/м$^2$ трещин не превышает 0,5...1 мкм, а глубина - 8...10 мкм. Возникающая на поверхности покрытия трещина при распространении в глубь теряет энергию, разделяется на несколько каналов, на расстоянии 8-10 мкм от поверхности прекращает свой рост. В большинстве случаев глубина трещины меньше трансформируемого слоя и поэтому обработанное покрытие становится как бы загерметизированным (рис.1). Однако наличие отдельных сквозных трещин на всю глубину трансформированного слоя несколько снижает этот эффект (рис.2). При увеличении плотности энергии более 200 Дж/см$^2$ в покрытии образуются крупные сферические поры и полости (рис.3). Они концентрируются в основном вблизи кратера, образующегося под воздействием одиночного импульса [7-9].

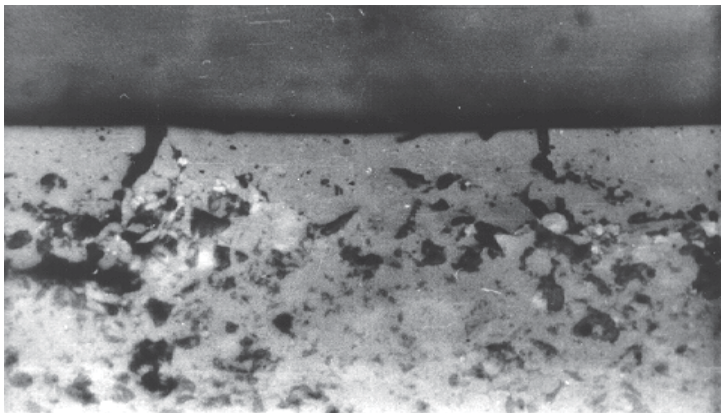


Рисунок 1 – Структура ТЗП после обработки импульсным $CO_2$ лазером с длиной волны λ=9,25 мкм и с плотностью энергии импульса 1000 кДж/м$^2$(×500)

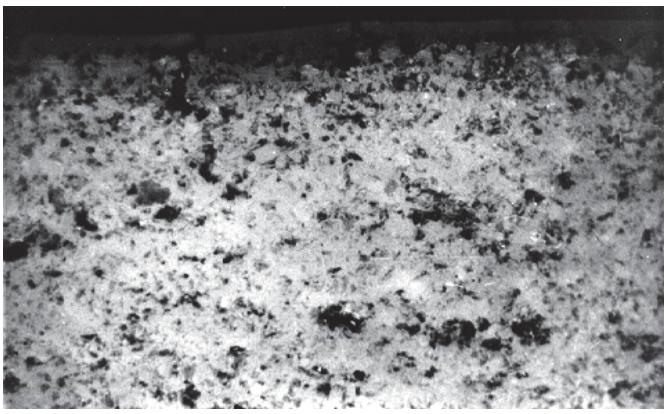


Рисунок 2 – Структура ТЗП после обработки импульсным $CO_2$ лазером λ=9,25 мкм и с плотностью энергии импульса 1500 кДж/м$^2$(×500)

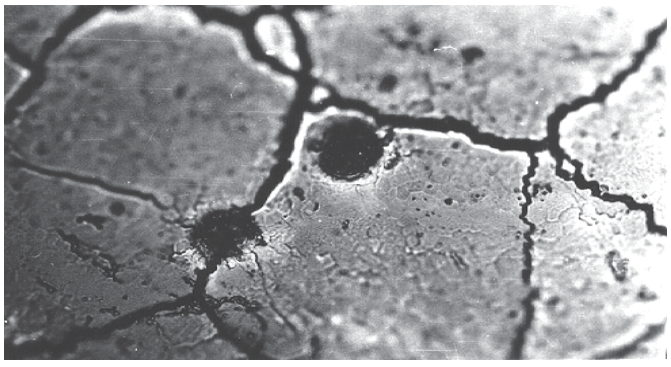


Рисунок 3 – Структура ТЗП после обработки импульсным $CO_2$ лазером λ=9,25 мкм и с плотностью энергии импульса 2000 кДж/м$^2$(×500)

В покрытии до обработки лазером образуется 6,6% моноклинной модификации, остальное практически тетрагональный диоксид, в котором при тонких исследованиях структуры можно обнаружить включения сложного оксида с формулой $Zr_3Y_4O_{12}$. Линии кубической модификации $ZrO_2$ на дифрактометре отсутствуют, а линии тетрагональной модификации заметно смещены в сторону увеличения параметров решетки. После обработки импульсным лазером с λ=9,25 мкм и с плотностью энергии импульса 1000 кДж/м$^2$в покрытии образуется сильно измельченная структура, исчезает моноклинная модификация $ZrO_2$ фактически получается 100% тетрагональная модификация, причем линии тетрагонального $ZrO_2$ смещаются в сторону уменьшения параметров решетки. При этом происходит выравнивание концен-

трации оксида иттрия в объеме покрытия (в структуре отсутствуют обогащенные оксидом иттрия темные области). Вероятно, быстрое охлаждение покрытий после лазерной обработки подавляет диффузионные процессы, приводящие к перераспределению оксида иттрия. Идентифицируется также сложный оксид, но уже с другой формулой $Y_{0,15}Zr_{0,85}O_{1,93}$. Наличие и количественное содержание кубической модификации $ZrO_2$ обычно изучают в интервале $2\theta=72\text{-}76^{O}$ (линия (400) с учетом анализа профиля линий (004) и (400) тетрагональной фазы). Результаты исследований, выполненных с помощью программы разделения наложенных линий «SPLEET.LINE», позволяют идентифицировать только линии тетрагональной модификации. Анализ профиля линий с учетом дуплетности также подтверждает отсутствие кубической фазы в обработанных покрытиях. При плазменном напылении с охлаждением при расходе сжатого воздуха 1м$^3$/мин, давлении р=4 атм и значении тока 400 А в ТЗП формируется максимальное количество тетрагональной фазы- 98% (рис.4), что соответствует максимальной термостойкости (рис. 6). При отсутствии охлаждения в покрытии появляется и кубическая фаза (рис. 5)., ухудшающая термостойкость. Влияние размера частиц на фазовый состав показано на рис.7 При увеличении размера фракции с <50 мкм до 100-160 мкм в покрытии уменьшится количество тетрагональной фазы, приводящее к ухудшению термостойкости.

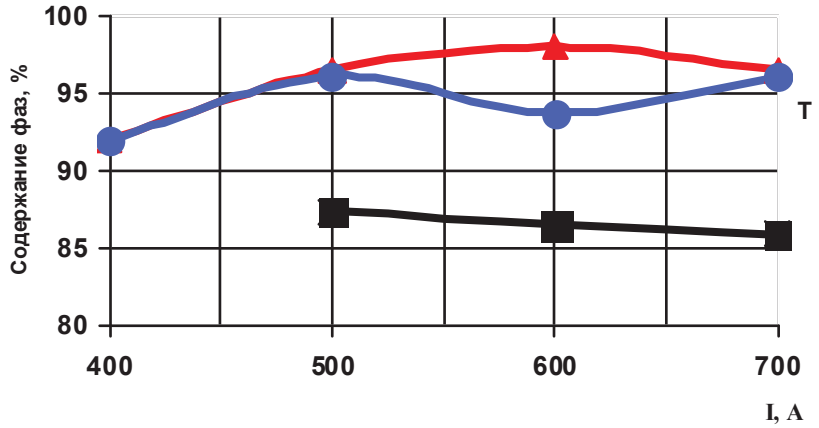



Рисунок 4 – Влияние величины тока дуги плазмотрона и степени охлаждения на фазовый состав $ZrO_2$-7%$Y_2O_3$ покрытия (Т – тетрагональная) при L=110 мм, $R_{H_2}$=8 л/мин: ●– расход сжатого воздуха 1,5 м$^3$/мин р=6 атм; ▲– расход сжатого воздуха 1м$^3$/мин , давление сжатого воздуха р=4 атм; ■ – без охлаждения (размер частиц менее 50 мкм)

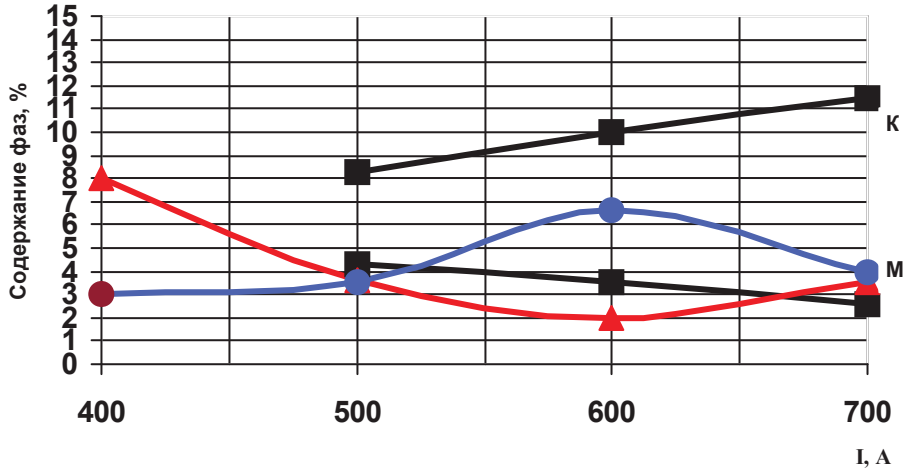



Рисунок 5 – Влияние величины тока дуги плазмотрона и степени охлаждения на фазовый состав $ZrO_2$-7%$Y_2O_3$ покрытия (М – моноклинная, К – кубическая) параметры напыления те же, что и на рис. 6

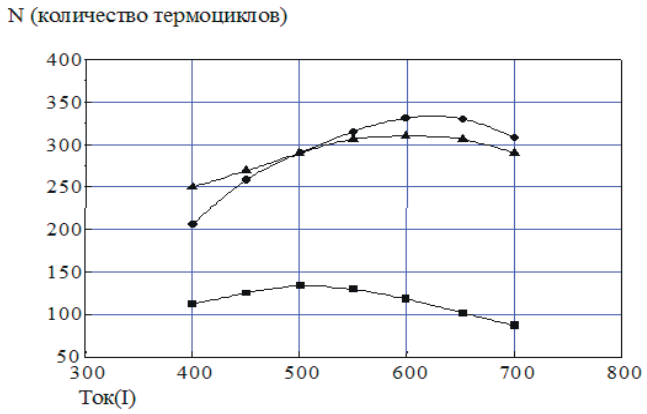



Рисунок 6 – Влияние тока на величину КИМ (а) и стойкость к термоциклированию (б) при напылении ТЗП на основе $ZrO_2$ при L=110 мм, $Rн_2$=8 л/мин: ●– расход сжатого воздуха 1,5 м$^3$/мин p=6 атм; ▲ – расход сжатого воздуха 1 м$^3$/мин p=4 атм; ■– без охлаждения (размер порошка менее 50 мкм)

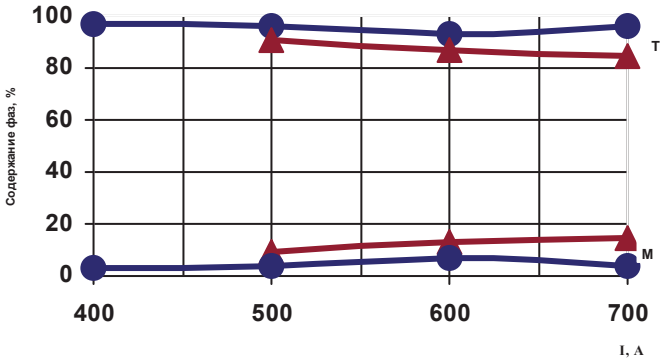



Рисунок 7 – Влияние тока и размеров частиц порошка на фазовый состав при напылении ТЗП на основе $ZrO_2$ ($Rн_2$=8 л/мин, RAr=30 л/мин, L=110 мм, $R_{ПОР}$=2 кг/ч): ●– < 50 мкм; ▲– 50–63 мкм; ■ – 63–100 мкм; ▼– 100–160 мкм

После нанесения покрытия подвергались циклическому тестированию в печи при температуре 1100° С. Температура в печи замерялась платиновой термопарой и поддерживалась в пределах 1100° С±8°С. Стойкость покрытий к термоциклированию определяли по количеству термоциклов, которые выдерживали образцы до разрушения слоя керамического покрытия. Цикл состоял из нагрева в течение 10 минут, выдержке при 1100° С в течение 60 мин и 60-ти минутном охлаждении при 300° С. В течение каждых 10 циклов образцы извлекались из печи для проверки, когда температура опускалась до 300° С. Испытания продолжались до разрушения керамического покрытия, за которое принимали формирование трещины, видимой невооруженным взглядом. Сравнительные данные испытаний покрытий, полученных по источнику [8] разработанному авторами способу приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние способа получения теплозащитного покрытия из частично стабилизированного диоксида циркония на фазовый состав покрытий и стойкость к термоциклированию

| Химический состав материала | Метод получения покрытия | Содержание фаз, % | | | Количество термоциклов |
|---|---|---|---|---|---|
| | | моноклинная | тетрагональная | кубическая | |
| $ZrO_2$ -7% мас.% $Y_2O_3$ | прототип | 2/4 | 96,9/78,9 | 1,1/17,1 | 520 |
| $ZrO_2$ -7% мас.% $Y_2O_3$ | предлагаемый | -/6,1 | 98,9/93,9 | 1,1/- | 760 |

*- Фазовый состав плазменных покрытий до / после термоциклирования

**Выводы.** В плазменном покрытии на основе диоксида циркония до обработки лазером образуется 6,6% моноклинной модификации, остальное практически тетрагональный диоксид, в котором при тонких исследованиях структуры можно обнаружить включения сложного оксида с формулой $Zr_3Y_4O_{12}$. Линии кубической модификации $ZrO_2$ на дифрактометре отсутствуют, а линии тетрагональной модификации заметно смещены в сторону увеличения параметров решетки. После обработки импульсным лазером в покрытии образуется сильно измельченная структура, исчезает моноклинная модификация $ZrO_2$ фактически получается 100% тетрагональная модификация, причем линии тетрагонального $ZrO_2$ смещаются в сторону уменьшения параметров решетки . При этом происходит выравнивание концентрации оксида иттрия в объеме покрытия.Покрытие, полученное из порошка $ZrO_2$ -7 % мас.% $Y_2O_3$, по разработанному авторами способу, выдерживают в 1,46 раза больше циклов нагрев-охлаждение, чем подобное покрытия, изготовленное ранее. Таким образом предложенный способ позволяет повысить стойкости покрытия к термоциклированию при температурах 1100 °С, что приводит к более длительной защите подложки от воздействий высоких температур.

## Список литературы

1. *Стернс К.А.* Теплозащитные покрытия // Аэрокосмическая техника.- 1997.- №10.- С. 144-164.

2. *Ильющенко А.Ф.* Плазменные покрытия на основе керамических материалов/ А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, А.И. Шевцов. - Минск: Беспринт, 2006.- 316 с.

3. *Phane L.* Plasma-sprayed ceramic thermal barrier coatings for Turbine vane platforms // Thin Solid Films.1990. P. 455-461.

4. *Оковитый В.А.* Влияние технологических параметров керамического слоя теплозащитного покрытия на стойкость к термоциклированию / В.А. Оковитый, // Порошковая металлургия.-Гомель :ИММС НАНБ, 1998.- Вып.21.- С. 101-105.

8. *Оковитый В.А.* Влияние технологических параметров керамического слоя теплозащитного покрытия на стойкость к термоциклированию / В.А.Оковитый, // Порошковая металлургия.-Гомель :ИММС НАНБ, 1998.- Вып.21.- С. 101-105.

9. Способ получения теплозащитного покрытия: пат.2979 Респ. Беларусь, МКИ4 С 23 С 4/12, 4/10. / Оковитый В.А., Ильющенко А.Ф., Соболевский С.Б, Ивашко В. С.; заявитель НИИ порошковой металлургии с ОП -№ 970629; заявл 18.11.1997; опубл. 20.11.1999// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1999. – № 4.

## HIGH ENERGY PLASMA TREATMENT COATINGS BASED ON ZIRCONIUM DIOXIDE

**Devoino O. G.**[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: scvdmed@bntu.by
**Okovity V. V.**[1], e-mail: vasil_ok@inbox.ru

[1]Belarussian National Technical University, 65, avenue Nezavisimosty, Minsk, 220013, Belarus

**Abstract.** In the paper processes of laser processing plasma coating based on zirconium dioxide. High temperature resistant thermal barrier coatings (TBC) depends on the processes occurring at the interface between the metal and the ceramic coating layers. The laser effect on samples with HRC leads to changes in the structure of the oxide layer of $ZrO_2$-$Y_2O_3$. While its initial surface characterized by the development relief treating substantially aligned, it cracked, broken into fragments. Conditions of laser treatment are high thermal shock followed by rapid cooling of the surface, as a result creates a significant thermal stress, which, obviously, are the cause of the fragmentation surface. The coating is formed by laser processing to 6.6% of the monoclinic modification, the rest almost tetragonal dioxide. After treatment, a pulsed laser is formed in the coating strongly crushed structure disappears monoclinic $ZrO_2$ actually get 100% tetragonal modification.

**Keywords:** Plasma coatings, heat thermal barrier coatings, laser treatment, the metal-ceramic, zirconia modification.

**УДК 621.373.826**

# ЛАЗЕРНЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*А. М. ОРИШИЧ, докт. физ.-мат.наук, профессор*

ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, laser@itam.nsc.ru

**Аннотация:** В работе рассматриваются исследования, проводимые в ИТПМ СО РАН в области лазерной сварки металлических сплавов и лазерной наплавки никель-хромовых и железных порошков на стальную пластину с целью получения биметаллических износостойких покрытий.

Исследована возможность получения слоя композиционного материала высокой твердости на корпусе инструмента из стали 65Г методом лазерной наплавки порошковой стали Р6М5. Показано, что добавление сферического релита в никель-хромовый порошок можно рекомендовать в качестве компонента износостойких покрытий и наплавок для деталей, работающих в условиях абразивного износа.

Изучено влияния нанопорошковых модификаторов на свойства неразъемных соединения, полученных лазерной сваркой алюминиевых, стальных и титановых сплавов, в том числе и разнородных металлов.

**Ключевые слова:** лазерная наплавка, микротвердость, износостойкость, $CO_2$-лазер, биметалл, никель хромовые покрытия, Р6М5.

**Введение**

Лазерно-порошковая наплавка активно исследовалась в мире последние годы, как метод упрочнения поверхности, создания высокопрочного режущего инструмента, восстановление изношенных деталей и т.п.

В ИТПМ СО РАН, начиная с 1994 года, проводилось комплексное изучение структуры металла, формируемой при воздействии мощного излучения на порошки, механические свойства создаваемого наплавленного слоя, особенности сплавления разнородных материалов не свариваемых традиционными методами, создание композиционных структур, наращивание материалов [1].

Однако, как получение металлопорошковой композиции, так и процессы формирования и микроструктура наплавленного слоя остаются практически не исследованными. А именно от них зависят механические свойства создаваемых деталей, прочность, абразивная и ударная стойкость и т.п., фактически – эксплуатационные возможности продуктов новой инновационной технологии.

Получение качественных сварных соединений металлов является весьма сложной задачей. Зона сварного шва обладает крупнокристаллической, четко ориентированной ферритоцементитной структурой с ферритом видманштеттова типа. Длина кристаллов достигает 100 -150 мкм. Особенностью структуры такого типа является низкий уровень пластических свойств. Для обеспечения высокого комплекса механических свойств желательно устранение структуры видманштеттова феррита. В последние годы большой интерес вызывают исследования по применению нанодисперсных тугоплавких материалов в качестве модифицирующих добавок для повышения качества стали и сплавов. В ИТПМ СО РАН проведен большой цикл экспериментальных работ по изучению влияния нанопорошковых модификаторов на свойства неразъемных соединения, полученных лазерной сваркой алюминиевых, стальных и титановых сплавов, в том числе и разнородных металлов [2-8].

В данных исследованиях в качестве технологического оборудования использовался автоматизированный лазерный технологический комплекс (АЛТК), созданный в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН на базе $CO_2$–лазера мощностью 2 кВт с конвективным охлаждением рабочих газов.

**Результаты и обсуждение**

**Оплавление самофлюсующихся покрытий и упрочнение никель-хромовых самофлюсующихся сплавов карбидом вольфрама**

Наплавку никель-хромового ПГ-СР3 износостойкого покрытия производили на оптимальных режимах процесса. Мощность лазерного излучения 1,65 кВт. Луч лазера сканировал по поверхности с частотой 62 Гц, скорость движения луча составляла 3,2 м/с, размах сканирования 5 мм. При этом скорость подачи заготовки составляла 1,2 м/мин.

Было установлено, что увеличение доли твёрдых фаз в наплавленном покрытии снижает сопротивление ударно-абразивному изнашиванию. Структурные исследования показали, что это связано с выкрашиванием фрагментов покрытия по хрупкой карбидной сетке, выделившейся по границам дендритных ячеек. С учётом этих данных были составлены композиции наплавочных материалов из самофлюсующегося

никель-хромового сплава ПГ-10Н-01 и карбида вольфрама, который вводили в виде сфероидизованных частиц релита – плавленого карбида вольфрама диаметром 53- 83 мкм. Порошковая шихта составлялась из 55% самофлюсующегося порошкового сплава ПГ-10Н-01 (С-0,4%; Si – 2,6%; B-2,0%; Cr-13,5%; Ti-0,1% Ni- основа) с добавлением 45% релита. Шихту укладывали на основу из стали 65Г (0,63% С; 1,1% Mn; 0,32% Si) с помощью специального дозатора - кристаллизатора.

При плавлении Ni-Cr-B-Si-C сплава частицы релита остаются твёрдыми. Происходит взаимная диффузия компонентов, увеличивается количество карбидной эвтектики и мелких карбидов при последующей кристаллизации. Микротвёрдость, определённая на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 50 г., составила $H_{50}$ = 32,36 ГПа. Для сравнения, микротвердость основы (сталь 65Г), закалённой при лазерной обработке на мартенсит составляет $H_{50}$ = 10,7 ГПа.

Износостойкость полученного композиционного покрытия оценивали при трении о жёстко закреплённый абразив в соответствии с требованиями ГОСТ 17367-71. Одновременно испытывали образцы покрытия, полученные лазерной наплавкой износостойкого сплава ПГ-10Н-01, и наплавкой порошковой быстрорежущей инструментальной стали Р6М5 – ПМ (0,84%С;0,48%Si; 0,50% Mn; 3,90%Cr 6,1%W; 1,9%V; Mo-4,9%;). Появления трещин, отколов, выкрашивания наплавки во время испытаний не наблюдалось. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний

| Состав покрытия | Твёрдость | $V_{износа}$, $10^{-7}$, кг/с |
|---|---|---|
| ПГ - 10Н - 01 | $HRC_э$ 45 - 48 | 25,0 |
| Р6М5 - ПМ | $HRC_э$ 66 | 15,6 |
| ПГ - 10Н - 01 – 55 % ,Релит – 45 % | $H_{50}$=32,36 ГПа | 4,9 |

Из приведённых данных следует, что износостойкость сплава ПГ - 10 Н - 01 при трении о жёстко закреплённый абразив увеличилась в 5 раз за счёт дополнительного упрочнения релитом сферическим и более чем в 3 раза превышает износостойкость быстрорежущей стали.

**Лазерная наплавка быстрорежущей стали.**

В данной работе в качестве присадки использовали порошок из стали типа Р6М5 с частицами диаметром до 150-170 мкм.

Результаты исследования показали, что регулирование термических циклов лазерной наплавки позволяет получить наплавленную быстрорежущую сталь со структурой высоколегированной аустенитно-мартенситной смеси с дисперсными включениями карбидов толщиной до 10 мм без каких-либо макродефектов, с твердостью 63 - 64 HRC, то есть фактически создать биметаллические структуры (Рис.1,2).

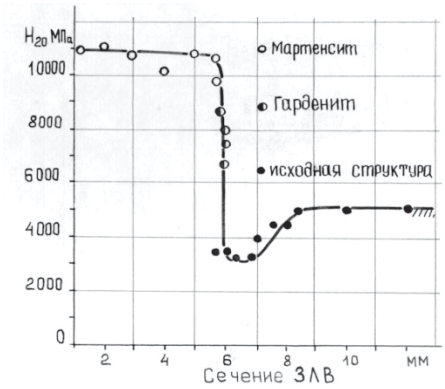



Рисунок 1 – Изменение микротвердости по сечению.

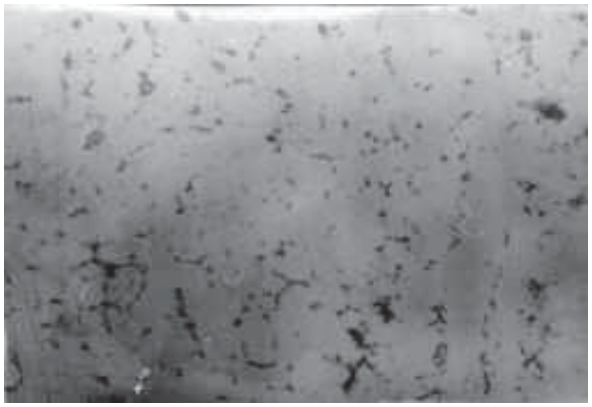


Рисунок 2 – Структура карбидной фазы при лазерной обработке наплавленного покрытия Р6М5.

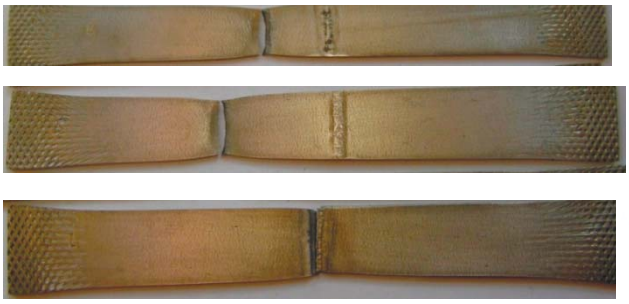
После стандартного трехкратного отпуска при 560°С твердость наплавленной стали Р6М5 увеличивается до 66 - 67 HRC.

**Лазерная сварка металлов**

Введение специально подготовленного нанодисперсного порошка в расплав формирует дисперсную систему, в которой ядром каждой частицы суспензии служит твердая фаза, гетерогенизирующая жидкий металл по химическому составу, вызывая концентрационное переохлаждение в объеме адсорбированного на поверхности наночастиц слоя. В результате этого каждая наночастица становится потенциальной затравкой для зарождения новой фазы (кристалла,

интерметаллического или химического соединений и др.). Благодаря этому в расплаве в процессе его охлаждения формируется мелкодисперсная глобулярная структура. В качестве модифицирующих соединений были выбраны: нитрид титана (TiN), оксид иттрия ($Y_2O_3$), полученные методом плазмохимического синтеза, в матрице из металлического.

**Нержавеющая сталь.** На рис. 3 представлены фотографии опытных (модифицированных) и контрольного (не модифицированного) образцов сварного соединения. Нетрудно видеть, что разрыв у опытных образцов произошел по основному металлу, а у контрольного – в области зоны термического влияния. В табл. 2 приведены результаты механических испытаний.



1 Модифицированные нанопорошком:TiN (0,02%)+Y2O3 (0,02%) +Ti+Fe;

2 Модифицированные нанопорошком: TiN (0,04%) + Y2O3 (0,04%) +Ti+Fe,

3 без наномодификатора.

Рисунок 3 – Фотографии образцов после механических испытаний.

Таблица 2 – Механические характеристики сварных образцов

| Номер образца на рис. 6 | $\sigma_B$, МПа | $\sigma_T$, МПа | $\delta$, % | $\psi$, % |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 593 | 259,7 | 60,0 | 59,02 |
| 2 | 606,7 | 265,7 | 58,0 | 51,89 |
| 3 | 510 | 261 | 56,0 | 53,5 |

**Сварка титановых сплавов.** Влияние наномодифицирующих (НМ) добавок разного химического состава на механические свойства сварного соединения исследовалось при сварки пластин толщиной 2 мм из сплава ВТ1-0. Концентрация модифицирующей добавки, вводимой в сварочную ванну, составляла не более 0,05 % по массе в расчете на нитридосодержащую тугоплавкую составляющую. Мощность лазерного луча равнялась 2,0 кВт, скорость сварки - 2 м/мин. Экспериментально установлено, что применение НМ положительно сказывается на механических характеристиках сварного соединения. Так, относительное удлинение повысилось в 2 - 4,9 раза, предел прочности в 1,23 -1.35 раз, а предел текучести в 1,8 – 2,0 раза.

**Сварка разнородных, не свариваемых традиционными методами, металлов.** Сварка титана и стали является важным процессом при производстве деталей и механизмов, в том числе и биметаллических (титановый сплав – нержавеющая сталь). Известно, что аустенитные коррозионностойкие стали и титановые сплавы обладают крайне плохой свариваемостью. Впервые при формировании сварного соединения обычно не свариваемых материалов, например, титан–медь–сталь 12Х18Н10Т наблюдается значительное растворение и перемешивание основных металлов в жидкометаллической медной прослойке. В таблице 3 приведены осредненные значения механических испытаний четырех образцов с применением термообработки в вакуумной печи и без термообработки.

Таблица 3 – Механические характеристики контрольного и опытного образцов

| Предел временной прочности, $\sigma_B$, МПа | Предел текучести, $\sigma_т$, МПа | Относительное удлинение, $\delta$,% |
|---|---|---|
| Без термообработки | | |
| 373,4 | 250,4 | 3.4 |
| С термообработкой, 1 час при 300 °С в вакууме | | |
| 417, 42 | 213,26 | 5,25 |

**Заключение**

Износостойкость наплавленного лазером самофлюсующегося Ni-Cr-B-Si-C сплава при трении о жёстко закреплённый абразив увеличилась в 5 раз за счёт дополнительного упрочнения релитом сферическим и более чем в 3 раза

превышает износостойкость быстрорежущей стали.

Релит сферический можно рекомендовать в качестве компонента износостойких покрытий и наплавок для деталей, работающих в условиях абразивного износа: бурового инструмента, рабочих органов землеройных, строительных и дорожных машин, глиномесов, деталей металлургического оборудования и др.

Применение особенностей лазерной сварки (т.е. режима кинжального проплавления) и использование нанодисперсных тугоплавких материалов в качестве модифицирующих добавок позволило развить в ИТПМ СО РАН новое научное направление - лазерную микрометаллургию. Разработанные методы управления процессом кристаллизации расплава в ванне лазерной сварки позволили улучшить микроструктуру сварного шва и показали перспективность разработанных методов для создания неразъемных соединений различных металлов, в том числе и разнородных, не свариваемых обычными методами.

## Список литературы


1. Низкотемпературная плазма. Том 18. Высокоэнергетические процессы обработки материалов. Под ред М.Ф. Жукова \Новосибирск. «Наука» 2000, 425 с.
2. *Afonin Yu. V, Orishich A.M., Cherepanov A.N.* Welding of titanium, steel, and aluminium–lithium alloy by the CW $CO_2$ laser beam /The International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2010)»26-30 сентября Anaheim, CA, USA Paper 1201
3. *Черепанов А.Н., Афонин Ю.В., Маликов А.Г., Оришич А.М.* О применении нанопорошков тугоплавких соединений при лазерной обработке материалов// ISSN 0131-1336// Тяжелое машиностроение,2008 №4 стр 25,26
4. *Оришич А.М., Головин Е.Д., Буров В.Г., Батаев В.А., Афонин Ю.В., Огнев А.Ю.* Особенности формирования сварных швов при лазерной сварке углеродистых сталей. Обработка металлов. 2005. №4 (29) С. 13-14. Новосибирск.
5. *Yu.V. Afonin, A.A. Bataev, V.G. Burov, A.M. Orishich, A. G. Malikov, V.A.Kochnev, E.G. Shikhalev*. $CO_2$-Laser welding of titanium, low-carbon and chromium-nickel steel // XVI International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Laser Conference GCL/HPL 2006 Gmunden, Austria, September 4-8, 2006 Book of Summaries P. 60
6. *Е. Д. Головин, В. Г. Буров, А. М. Оришич, А. Н. Черепанов, А. И. Смирнов, Д. Д. Головин*. Влияние наноразмерного оксида иттрия на структуру швов титанового сплава ВТ20, получаемых по технологии лазерной сварки // Обработка металлов. 2011. № 2 (51). С. 57–60.
7. *Ю.В. Афонин,А.Н. Черепанов, А.М. Оришич.* Лазерная сварка стали с титановым сплавом с применением промежуточных вставок и нанопорошковых инокуляторов//Журнал «Тяжелое машиностроение», 2009, № 8, с. 24-26
8. *Черепанов А.Н., Афонин Ю.В., Оришич А.М., Фомин В.М., Батаев А.А.* Способ сварки материалов. Патент РФ №2404887. Бюл.№2. Опубл. 20.01.2009, Приоритет от 09.06.09. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 27 ноября 2010
9. *Гнюсов С. Ф., Клименов В. А., Алхимов Ю. В., Будницкий А. Д., Оришич А. М., Черепанов А. Н., Афонин Ю. В*. Формирование структуры титана и коррозионностойкой стали при лазерной сварке // Сварочное производство. – 2012 – № 1. – С. 17 – 22.


## LASER INNOVATION TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING


**Orishich A. M.**, D.Sc. (Physical and Mathematical), Professor, e-mail: laser@itam.nsc.ru

Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation



**Abstract:** The paper deals with research conducted at ITAM SB RAS in the field of laser welding of metal alloys and laser welding nickel-chromium and iron powder on a steel plate to produce bimetallic wear resistant coatings.

The possibility of obtaining a layer of composite material of high hardness on the tool body made of steel 65G by laser cladding powder steel R6M5 was studied. It was shown that the addition of spherical tungsten carbide in a nickel-chrome powder can be recommended as a component of wear-resistant coatings and claddings for parts operating under abrasive wear.

Nanopowder impact modifier on the properties of permanent compound obtained by laser welding of aluminum, steel, titanium alloys, including dissimilar metals was studied.



**Keywords:** laser welding, micro-hardness, wear resistance, CO2 Laser, a bimetal, nickel, chrome plating, R6M5.

**УДК 621.7.044.7**

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТА ИЗ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

*А. Г. ОВЧАРЕНКО, доктор техн. наук, профессор,*
*А. Ю. КОЗЛЮК, канд. техн. наук, доцент,*
*М. О. КУРЕПИН, инженер,*
*БТИ АлтГТУ, г. Бийск*

*Овчаренко А.Г.* - 659305, Бийск, ул. Трофимова, 27
Бийский технологический институт
Алтайского государственного технического университета,
e-mail: pbuk@bti.secna.ru

**Аннотация:** Проведены исследования микротвердости поверхностного слоя многогранных неперетачиваемых пластин из твердого сплава ВК8 и Т15К6 до и после комбинированной магнитно-импульсной обработки, включающей предварительный нагрев при различной температуре и последующее воздействие импульсным магнитным полем высокой напряженности на исследуемый инструмент. Приводятся экспериментальные исследования поверхностной микротвердости твердосплавных сменных многогранных пластин с целью определения оптимальных параметров предварительного нагрева. Построены гистограммы микротвердости контрольных образцов и обработанных КМИО образцов при различных температурах предварительного нагрева для твердых сплавов Т15К6 и ВК8 Анализ гистограмм показал, что распределение микротвердости близко к нормальному закону распределения, при этом среднее значение микротвердости после обработки увеличилось более чем на 293 HV для металлорежущего инструмента из сплава ВК8.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка, металлорежущий инструмент, твердосплавный инструмент, микротвердость, поверхностное упрочнение.

**Введение**

В настоящее время для производства режущих инструментов широко используются твердые сплавы. В их состав входят карбиды вольфрама, титана, тантала, сцементированные небольшим количеством кобальта. Карбиды вольфрама, титана и тантала обладают высокой твердостью, износостойкостью и теплостойкостью. Инструменты, оснащенные твердым сплавом, хорошо сопротивляются истиранию по сравнению с другими инструментальными материалами. В качестве недостатков, характерных для твердых сплавов, следует отметить дефицит кобальта, используемого в качестве матричного материала и его относительно ограниченные возможности релаксации внутренних напряжений. Дефицитным и дорогостоящим является также и присутствующий в больших количествах в твёрдых сплавах вольфрам. Этим определяется высокая актуальность поиска путей, обеспечивающих повышение эксплуатационных показателей твердосплавного инструмента.

Для упрочнения инструментальных твердых сплавов все чаще применяют различные методы: азотирование, термообработка, лазерные и плазменные методы, дробеструйная обработка, криогенная обработка, облучение малыми дозами гамма-квантов и электронов и др. Данные методы обработки имеют как положительные, так и отрицательные стороны, которые в свою очередь ограничивают их применение для повышения износостойкости серийно выпускаемого инструмента. Среди множества методов упрочнения наибольший интерес представляют методы, изменяющие состояние поверхностного слоя. К таким методам относится и магнитно-импульсная обработка, которая основана на воздействии импульсного магнитного поля на обрабатываемую поверхность с целью улучшения ее механических и физических свойств [1-2].

Для упрочнения инструментальных твердых сплавов в рамках данной работы использовалась комбинированная магнитно-импульсная обработка (КМИО), включающая воздействие локализованного импульсного магнитного поля высокой напряженности на предварительно нагретые токами высокой частоты сменные многогранные пластины из различных марок твердых сплавов [3].

**Материалы и методы**

Для упрочнения инструмента из твердых сплавов магнитной обработкой в его составе должны быть ферромагнетики, наилучшими из которых являются железо, никель и кобальт. Наиболее износостойкими и перспективными являются твердые сплавы на основе кобальта, поэтому в качестве объектов для экспериментального исследования были

выбраны сменные многогранные пластины из самых распространенных в промышленности твердых сплавов ВК8, Т15К6.

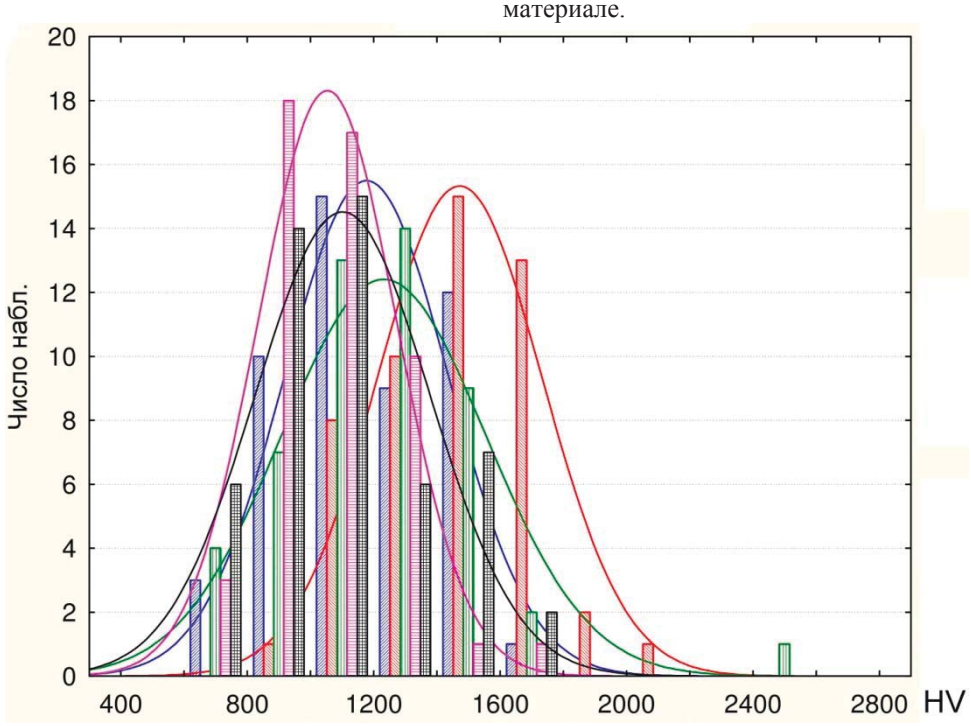
В качестве основных рабочих элементов экспериментальной установки для обработки металлорежущего инструмента использовались индуктор для магнитно-импульсной обработки, состоящий из концентратора магнитного поля и катушки индуктивности, и индуктор установки индукционного нагрева. Применение такой конструкции индуктора для магнитно-импульсной обработки позволяет создавать необходимую напряженность магнитного поля при обработке инструмента различной формы, при этом установка его на одной оси с индуктором индукционного нагрева позволяет относительно быстро перемещать обрабатываемый образец, сокращая время обработки и снижая влияние охлаждения при перемещении образца [4].

Микротвердость поверхности образцов сменных многогранных пластин из твердых сплавов ВК8 и Т15К6 (ГОСТ 19045-80) до и после обработки определялась в соответствии с ГОСТ 25172-82, с помощью микротвердомера ПМТ -3.

**Результаты и обсуждения**

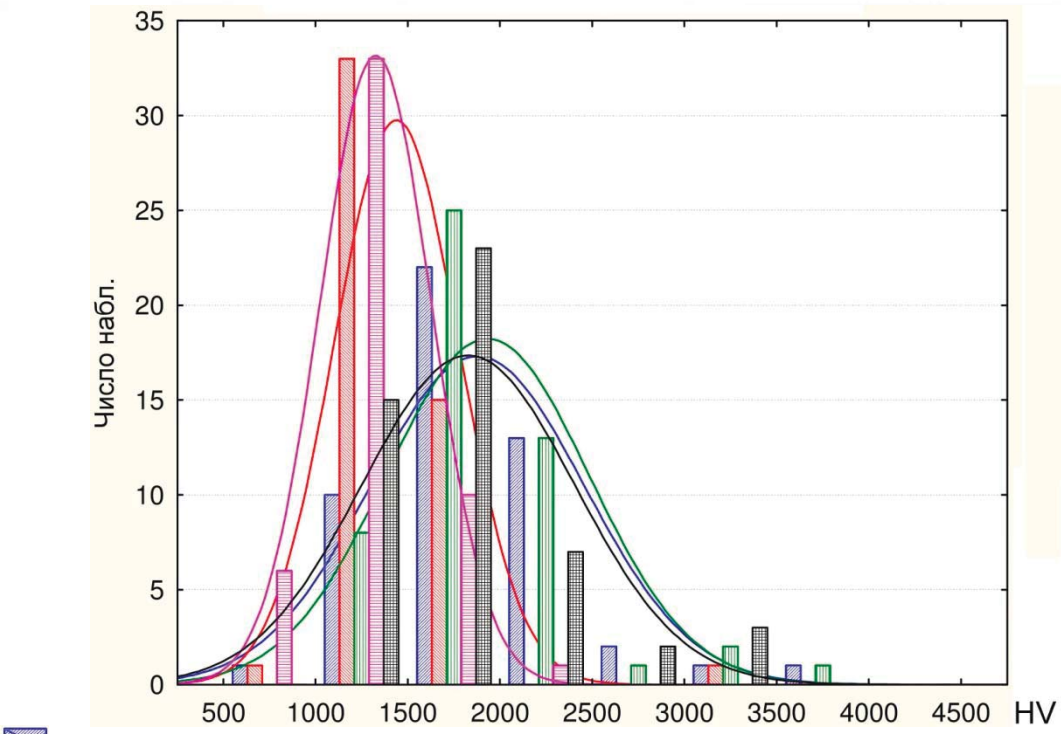
Результаты исследований микротвердости поверхностного слоя контрольных режущих пластин (без обработки) и пластин, прошедших комбинированную магнитно-импульсную обработку, представлены соответственно на рисунках 1 и 2. Для построения графиков были произведены измерения микротвердости в пятидесяти точках на поверхности образца для каждой температуры предварительного нагрева, измерялась твердость трех режущих кромок.

Исследованные образцы из твердого сплава характеризовались высокими значениями микротвердости с некоторым разбросом значений. Построение гистограмм микротвердости контрольных образцов и обработанных КМИО образцов при различных режимах предварительного нагрева показало, что распределение микротвердости близко к нормальному закону распределения. Так как твердый сплав является композиционым материалом, состоящим из наполнителя и кобальтовой связки, то именно увеличение минимального значения микротвердости будет являться основной показателем воздействия КМИО в силу воздействия магнитного поля только на кобальтовую связку, имеющую минимальное значение твердости в данном материале.




-контрольный образец;
- обработанный КМИО при температуре предварительного нагрева 400 ºС;
- обработанный КМИО при температуре предварительного нагрева 600 ºС;
- обработанный КМИО при температуре предварительного нагрева 800 ºС;
- обработанный КМИО при температуре предварительного нагрева 900 ºС.

Рисунок 1 – Распределение поверхностной микротвердости образцов из твердого сплава ВК8




-контрольный образец;
- обработанный КМИО при температуре предварительного нагрева 400 ºС;
- обработанный КМИО при температуре предварительного нагрева 600 ºС;
- обработанный КМИО при температуре предварительного нагрева 800 ºС;
- обработанный КМИО при температуре предварительного нагрева 900 ºС.

Рисунок 2 – Распределение поверхностной микротвердости образцов из твердого сплава Т15К6

Анализ гистограммы на рисунке 1 показал, что среднее значение микротвердости сплава ВК8 при температуре прадварительного нагрева 400 ºС увеличилось более чем на 293 HVпо сравнению с контрольным образцом, а минимальное значение микротвердости увеличилось на 350 HV. Это свидетельствует об увеличении микротвердости кобальтовой связки, на которую было направлено воздействие магнитного поля.

Анализ гистограммы на рисунке 2 показал, что образцы из твердого сплава Т15К6, обработанные КМИО при температуре 600ºС и 900ºС, имеют минимальное значение микротвердости больше чем у контрольного образца на 182 HV и 116 HV соответственно, но при этом разброс средних значений микротвердости существенно не изменился. Графики образцов, обработанных КМИО при температуре 400ºС и 800ºС, имеют среднее значение микротвердости меньше на 437 HV и 549 HV соответственно, чем значение микротвердости контрольного образца, но при этом разброс значений микротвердости этих образцов значительно уменьшился, что сложно объяснить, так как предполагается, что магнитно-импульсная обработка не влияет на карбиды вольфрама и тантала, зерна которых и имеют максимальную твердость.

Из анализа полученных данных следует, что оптимальной температурой предварительного нагрева для твёрдого сплава ВК8 является температура 400ºС. Поведение образцов из твердого сплава Т15К6 после магнитной обработки трудно объяснить, поэтому для оптимизации температуры предварительного нагрева необходимо проведение дополнительных экспериментов.

**Выводы**

Предложен перспективный способ и разработана экспериментальная установка для КМИО мелкоразмерного металлорежущего инструмента из твердых сплавов.

Экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенного способа по увеличению поверхностной микротвёрдости металлорежущего инструмента и позволили найти оптимальный режим КМИО для твердого сплава ВК8.

Предложенный способ может быть использован для упрочнения поверхности других видов инструментов и деталей машин при дальнейшей экспериментальной проверке.

## Список литературы

1. *Малыгин Б.В.* Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М.: Машиностроение – 1989. – 112 с.

2. *Белый И.В.*, *Фертик С.М., Хименко Л.Т.* Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: издательское объединение «Вища школа», 1977. -168 с.

3. *Овчаренко, А. Г.*, *Козлюк А. Ю., Курепин М. О.* и др. Исследование влияния комбинированной магнитно-импульсной обработки на качество твердосплавного инструмента // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. - №3. – С.95-98.

4. *Овчаренко А.Г.*, *Козлюк А.Ю., Курепин М.О.* Индукторы для комбинированной магнитно-импульсной обработки инструментов различной формы // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты) . - 2008.- №3. - С.11-12.

# OPTIMIZATION OF THE COMBINED PROCESS OF MAGNETIC-PULSE TREATMENT OF CARBIDE METAL CUTTING TOOLS

**Ovcharenko A. G.,** D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: pbuk@bti.secna.ru
**Kozlyuk A. Yu.,** Ph.D. (Engineering), Associate Professor
**Kurepin M. O.,** Engineer

Biysk Technological Institute, Trofimova str. 27, Biysk, 659305, RUSSIA

**Abstract:** Experimental studies of micro hardness of the surface layer of the multi-sided plates of alloy VK8 and T15K6 before and after combined magnetic-pulse treatment at various temperatures of preliminary heating were performed. Histograms showing the micro hardness of control samples and processed samples at different temperatures preheating for hard alloys T15K6 and VK8. Analysis of the histograms showed that the distribution of micro hardness close to normal distribution, with mean value of micro hardness after combined magnetic-pulse treatment increased by more than 293 HV for metal cutting tools made of alloy VK8.

**Keywords**: magnetic-pulse treatment, metal cutting tool, carbide tools, micro hardness, hardening of the surface.

**УДК 621.793**

# ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

*Е. Ф.ПАНТЕЛЕЕНКО[1], канд. техн. наук, доцент,*
*Г. В.ПЕТРИШИН[2], канд. техн. наук, доцент*
(*[1]БНТУ, г. Минск, Беларусь; [2]ГГТУ им. П.О.Сухого, г.Гомель, Беларусь*)

Пантелеенко Е.Ф. – 220013, г.Минск, пр-т Независимости,65
Белорусский национальный технический университет,
e-mail: panteleyenko@inbox.ru

**Аннотация:** В данной работе представлены результаты исследований структуры новых восстановительно-упрочняющих покрытий, полученных методом электродуговой наплавки из композиций порошков на основе отходов производства чугунной дроби и отходов механической обработки деталей из твердого сплава ВК3.

**Ключевые слова**: Отходы производства дроби, стружка, покрытия, электродуговая наплавка, структура, микротвердость.

**Введение**

Поскольку в Республике Беларусь развит машиностроительный комплекс, то на предприятиях ежегодно образуется огромное количество металлических дисперсных и крупногабаритных отходов. Авторами был предложен метод повторного использования отходов производства дроби для упрочнения и восстановления деталей машин строительного и сельскохозяйственного профиля, подвергающихся абразивному изнашиванию [1, 2]. Дальнейшие исследования в данной области направлены на расширение спектра применяемых отходов. Так, для повышения износостойкости разработанных ранее покрытий, к разработанным порошкам из борированных отходов производства дроби предложено добавлять дисперсные отходы, полученные при обработке твердых сплавов.

**Материалы и методы**

Покрытия наносили на подложку из стали 40. Для получения покрытий использовали композиции порошков из диффузионно-легированных бором отходов производства чугунной колотой дроби (ДЧК) фракции 0,8 – 1 мм с содержанием бора 15 масс.% и стружки твердого сплава ВК3. Образцы покрытий получали методом электродуговой наплавки неплавящимся угольным электродом с использованием сварочной установки инверторного типа. Режим нанесения приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Режим нанесения магнитно-электрических покрытий из смеси борированной ДЧК и стружки ВК-3

| | |
|---|---|
| Сила тока, А | 100 |
| Напряжение холостого хода, В | 12 |
| Диаметр электрода, мм | 8 |

Получен ряд покрытий из порошков с различным соотношением компонентов. Ряд полученных покрытий приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Покрытия с различным соотношением компонентов.

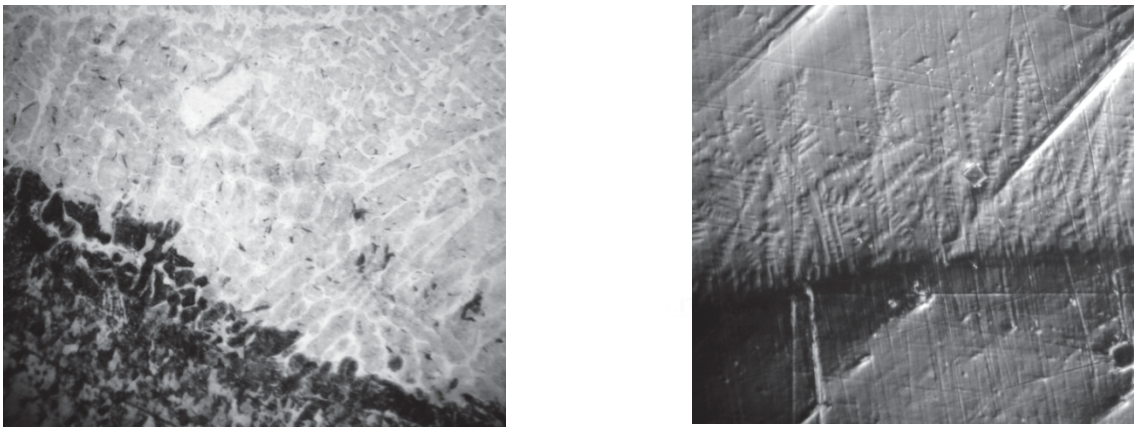
| Номер покрытия | Количество борированной ДЧК, % | Количество стружки ВК-3, % |
|---|---|---|
| 1 | 80 | 20 |
| 2 | 60 | 40 |
| 3 | 50 | 50 |
| 4 | 30 | 70 |

Шлифы покрытий готовили в соответствии с требованиями ГОСТ 9.302–88. Изучение микроструктуры проводили с помощью микроскопа AXIOVERT 40MAT фирмы METCO. Микродюрометрические исследования проводили на приборе METCON 3/6 согласно ГОСТ 9450–76.

**Результаты и обсуждение**

У большинства покрытий зона сплавления с

подложкой отличается ориентацией осей дендритов в направлении основного отвода тепла, т.е перпендикулярно границе раздела. Это объясняется высокой скоростью охлаждения данной области и значительным градиентом температур на границе перехода «подложка-покрытие». Кроме этого заметно смешение зерен материала подложки и покрытия, сами включения несколько крупнее, чем в целом объеме покрытия (рисунок 1).

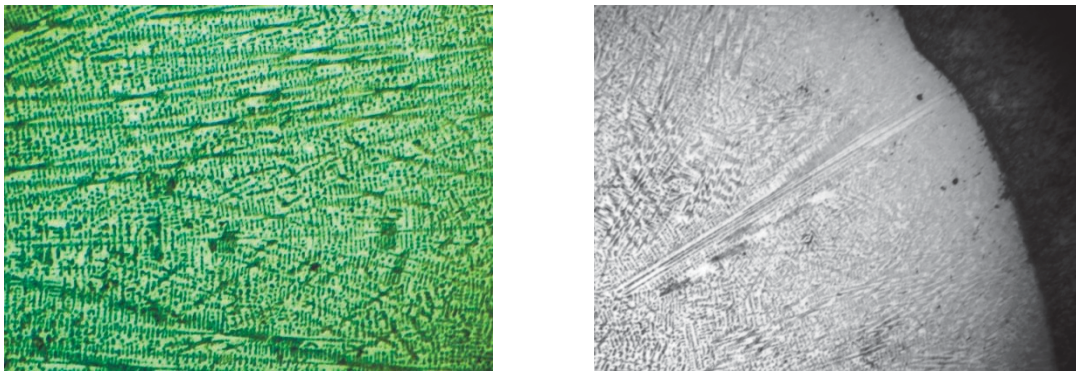


а б

Рисунок 1 – Зона покрытие-подложка: а – покрытие № 1; б – покрытие № 3

Наряду с отсутствием заметных пор в зоне сплавления это свидетельствует о прочном соединении покрытия с подложкой и отсутствии возможности отслаивания покрытия в процессе эксплуатации. Дисперсность видимых дендритных включений колеблется от 0,01 мм до 1 мм.

Покрытие №1 характеризуется высокой сплошностью и наличием доэвтектической структуры, сходной со структурой белого доэвтектического чугуна (рисунок 2,а). Покрытие состоит из белой эвтектической матрицы и темных дендритных включений избыточной фазы. Направление осей первого порядка дендритных включений ориентировано по направлению максимально быстрого отвода тепла – перпендикулярно подложке (рисунок 2,б).



а б

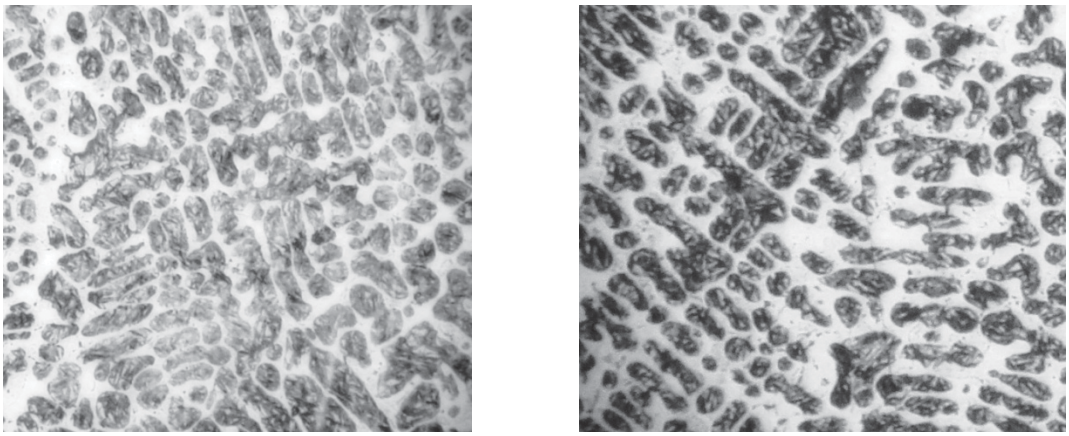
Рисунок 2 – Покрытие №2: а - общая структура; б – ориентация дендритных включений

Среднее значение микротвердости по сечению всего покрытия (от подложки до поверхности) составляет HV 794, что соответствует твердости цементита, хотя структура покрытия соответствует доэвтектическому чугуну.

Такие высокие показатели микротвердости объясняются присутствием в покрытии легирующих элементов – бора, вольфрама, кобальта. Микротвердость эвтектической матрицы (белого цвета, рисунки 1,2) в среднем 874 HV, данный показатель для избыточных перлитных включений составляет 698 HV. Твердость обычного перлита находится в пределах 200 – 250 HV. Повышенные показания исследуемого параметра объясняются тем, что дендриты перлита армированы ультрадисперсными (микродисперсными) частицами карбида вольфрама WC, размер которых находится в пределах от 2 до 10 мкм. На рисунке 3 а, б внутри дендритных темноокрашенных включений присутствуют игольчатой или угловатой формы более светлые включения WC. Твердость чистого карбида вольфрама составляет 1 400 – 1800 HV, однако включения данной фазы настолько микродис-

персны, что измерить отдельно микротвердость фазы не представляется возможным. Кроме этого включения WC демпфируют при вдавливании индентора за счет своих малых размеров, поэтому измерена только средняя твердость механической смеси перлита и карбида вольфрама.

Несмотря на высокую температуру, достигаемую при нанесении покрытия электродуговой наплавкой, достаточную даже для расплавления карбида вольфрама ($T_{пл}$ = 2870°C), все же образуется механическая смесь компонентов WC, $Fe_3(B,C)$, $Fe_xB_y$ и твердый раствор замещения Co – Fe (оба элемента характеризуются одинаковым типом кристаллической решетки и имеют близкие значения атомного радиуса), так как каждое из указанных соединений обладает отличной от других температурой плавления и типом кристаллической решетки. Карбиды вольфрама также присутствуют и в эвтектической матрице (белая фаза).

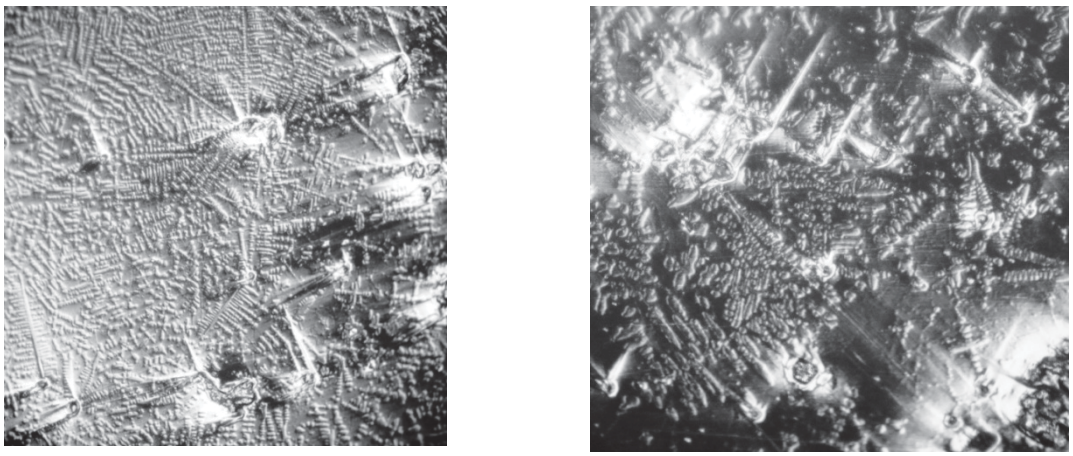


а б

Рисунок 3 – Дендритные включения перлита, упрочненные микродисперсными частицами карбида вольфрама

Высокое содержание бора в исходном материале не обеспечивает наличие боридной эвтектики в покрытии, так как при расплавлении компонентов материала идет интенсивное окисление не только железосодержащих компонентов, но также и карбида вольфрама (окисление карбида вольфрама на воздухе начинается при 500−700 °C, а выше 800 °C полностью окисляется в связи с большой летучестью). Поэтому большая часть присутствующего в системе бора расходуется на раскисление покрытия. Следует отметить, что данный процесс проходит в полной мере – в покрытии наблюдается минимальная пористость, высокая сплошность и однородность, а также отсутствие каких-либо включений оксидов.

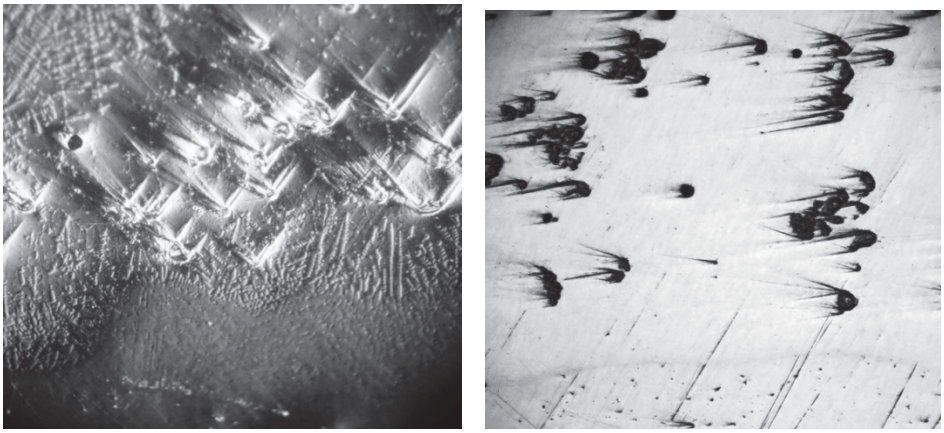
При увеличении количества ВК3 в наплавляемом порошке (покрытия №2 и №3) структура заметно меняется (рисунок 4): кроме областей дендритных включений появляются области без видимого рельефа (рисунок 4,б), а также мелкие единичные включения нерасплавившегося ВК3 дисперсностью 0,1 – 1 мкм (рисунок 4 а,б).



а б

Рисунок 4 – Нерасплавившиеся дисперсные включения ВК3, служащие центрами кристаллизации: а – покрытие №2; б – покрытие №3

Указанные включения являются центрами кристаллизации, поэтому вокруг них образуются звездоподобные дендитные образования, которые растут от центра. Сами включения характеризуются микротвердостью от 1300 до 1500 HV, что соответствует твердости карбида вольфрама (1400 – 1800 HV). Средняя твердость по Виккерсу областей дендритных включений составляет 800 – 900 HV, а областей без видимого рельефа – 1010 – 1200 HV. По мере приближения к поверхности количество дендритов уменьшается. В зоне, прилегающей к дисперсным нерасплавившимся включениям ВК3, зачастую дендриты отсутствуют (рисунок 5). Описываемые включения на приведенных здесь фотографиях окружены взаимно перпендикулярными или однонаправленными царапинами (рисунки 4 - 6). Они появились при изготовлении шлифа вследствие высокой твердости выступающих над поверхностью микровключений, не позволяющих надлежащим образом отполировать прилегающие области образца.



а б

Рисунок 5 – Включения ВК3: а - покрытие №2; покрытие №4

При соотношении борированной ДЧК и ВК3 30:70 (покрытие №4) дендритные включения практически исчезают, присутствуя только в зоне сплавления (рисунок 1,б). Зато заметно увеличивается количество микродисперсных нерасплавившихся частиц ВК3 (рисунок 6,а).

**Выводы**

Получены новые покрытия из композиций борированных отходов производства дроби и стружки твердого сплава ВК-3. Исследованы их структуры и свойства. Установлены закономерности формирования структур новых многокомпонентных покрытий из композиций порошков на основе металлических дисперсных отходов. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о перспективности и целесообразности их использования для восстановления и упрочения деталей машин и механизмов, работающих в условиях трения, поскольку покрытия характеризуются сплошностью, качественной зоной сплавления с подложкой и высокими показателями твердости.

## Список литературы

1. *Петришин, Г.В.* Износостойкие гетерогенные покрытия из борированных наплавочных материалов на основе отходов стальной дроби, нанесенные магнитно-электрическим методом: дисс. … канд.техн.наук: 05.02.01 / Г.В. Петришин; ГГТУ им. П.О. Сухого – Гомель, 2006. – 178 с.

2. *Пантелеенко, Е.Ф.* Самофлюсующиеся композиционные порошки из борированных отходов стальной и чугунной дроби для магнитно-электрического упрочнения и восстановления деталей машин: дисс. … канд.техн.наук: 05.16.06 / Е.Ф.Пантелеенко; БНТУ – Минск, 2009. – 163 с.

# FUNCTIONAL COATINGS MADE OF DISPERSED METAL WASTES

**Panteleyenko, E. F.**[1], C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: panteleyenko@inbox.ru
**Petrishin, G.V**[2]**.,** C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: grigpv@yandex.ru

[1]Belarussian National Technical University, 65, avenue Nezavisimosty, Minsk, 220013, Belarus
[2] Sukhoi State Technical University of Gomel, 48, avenue Oktyabrya, Gomel, 246746, Belarus

**Abstract:** This paper is devoted to the structure investigation of new recovering and strengthening coatings made of powder compositions via arc welding. Powder compositions consist of dispersed metal wastes: boronized (via chemical-thermal treatment) cast iron waste products and shavings of wolfram-cobalt hard alloy. The new coatings are characterized by the high quality of substrate–coating zone, heterogeneous structures, which depend of powder components ratio and high micro hardness. In this work the regularities of structure formation were discovered and it allows considering this new coatings to be available in recovering and hardening of machine details working under wear conditions.

**Keywords:** Fraction waste products, shavings, coating, arc welding, structure, micro hardness.

**УДК 621.793.71**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

*Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО[1], доктор техн. наук, профессор,*
*В. А. ОКОВИТЫЙ[1], канд. техн. наук,*
*О. Г. ДЕВОЙНО[1], доктор техн. наук, профессор,*
*В. М. АСТАШИНСКИЙ[2], доктор техн. наук, профессор,*
*В. В.ОКОВИТЫЙ[1], аспирант*
([1]*БНТУ, г. Минск, Беларусь,*[2]*ИТМО, г. Минск, Беларусь*)

Пантелеенко Ф.И. - 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65,
Белорусский национальный технический университет
e-mail: panteleyenkofi@mail.ru

**Аннотация:** В работе рассматривается процесс последующей высокоэнергетической обработки плазменных покрытий из материалов на основе многофункциональной оксидной керамики. При варьировании технологических параметров импульсно – плазменной обработки изменяли дистанцию воздействий импульсами и их суммарное количество. Эти технологические параметры оказывают влияние на толщину обработанных слоев покрытия. Для износостойких покрытий, являющихся объектом исследований, необходимы повышенные когезионная и адгезионная прочности. Поэтому суммарное количество импульсов должно обеспечить оплавление и уплотнение покрытий по всей толщине, что будет в полном объеме способствовать получению упрочненных структур. Покрытия обрабатывали импульсами плазменной струи, полученными с помощью газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнитоплазменный компрессор.

**Ключевые слова:** Плазменное напыление, импульсно – плазменная обработка, многофункциональная оксидная керамика, технологические параметры, износостойкие покрытия.

**Введение**

Критерием оптимизации импульсно – плазменной обработки покрытий, $Al_2O_3$-30% $Cr_2O_3$-12,5%$MoS_2$, полученного методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием выбрана максимальная степень их оплавления и уплотнения, что достигается увеличением энергетического уровня теплового и ударно – волнового воздействия импульса при уменьшении дистанции воздействия до минимального значения. Вместе с тем уменьшение дистанции ограничивается появлением признаков разрушения покрытий (например, развиваются трещины). Импульсно – плазменную обработку напыленных покрытий проводили с помощью газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнитоплазменный компрессор (МПК). Преимуществом МПК по сравнению с другими типами ускорителей является высокая устойчивость генерируемого им компрессионного потока, возможность управления его составом, размерами и параметрами плазмы при длительности разряда, достаточной для практических применений [1,2]. Установка для получения компрессионных плазменных импульсов, генерируемых МПК компактной геометрии, состоит из вакуумного блока, включающего камеру с системами откачки и напуска рабочего газа, разрядного устройства ускорителя, емкостного накопителя энергии, а также диагностического комплекса. Амплитудное значение разрядного тока МПК изменялось от 70 до 100 кА при увеличении начального напряжения накопителя энергии с 3 до 5 кВ. Длительность разряда при этом составляла ~ 150 мкс. Плотность энергии импульсных воздействий составляла (2 - 3) х $10^5$ Вт/см$^2$. Плазменное напыление покрытий для последующей импульсно – плазменной обработки выполняли в воздушной атмосфере на установке УПУ - 3Д с порошковым питателем TWIN - 10. Толщина покрытий составляла 0,5 - 0,6 мм.

**Теория**

При варьировании технологических параметров импульсно – плазменной обработки изменяли дистанцию воздействий импульсами и их суммарное количество [3-5]. Последний технологический параметр оказывает влияние на толщину обработанных слоев покрытия. Для износостойких покрытий, являющихся объектом исследований, необходимы повышенные когезионная и адгезионная прочности. Поэтому

суммарное количество импульсов должно обеспечить оплавление и уплотнение покрытий по всей толщине, что будет в полном объеме способствовать получению упрочненных структур. Покрытия обрабатывали импульсами плазменной струи, полученными с помощью газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнитоплазменный компрессор (МПК). Дистанцию обработки и суммарное количество импульсов варьировали с их оптимизацией по принятым критериям.

**Результаты и обсуждение**

В таблице 1 представлены результаты оптимизации дистанции обработки. Согласно данных таблицы 1, оптимальные дистанции импульсно-плазменной обработки покрытий для $Al_2O_3$-30% $Cr_2O_3$-12,5%MoS - 0,07м. Об этом свидетельствует стабилизация пористости, желаемого уменьшения которой по критерию оптимизации при дистанциях ниже 0,06 м практически не происходит, что, объясняется кратковременностью тепловых и динамических импульсных воздействий (~ 200 мкс), а также значительным содержанием в покрытиях тугоплавкой фазы, препятствующей возрастанию степени оплавления и уплотнения покрытий. Кроме того, при дистанциях 0,05 м для $Al_2O_3$-30% $Cr_2O_3$-12,5%Mo наблюдается разрушение покрытий с развитием макротрещин**.** Наряду с дистанцией обработки для формирования полностью оплавленных по всей толщине покрытий оптимизировали суммарное количество импульсов плазмы. Установлено, что необходимое и достаточное количество импульсов для полной обработки покрытий для, $Al_2O_3$-30% $Cr_2O_3$-12,5%MoS полученными методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием 12 - 13 воздействий. Дополнительные импульсы нецелесообразны, так как их многократное повторение ухудшает геометрию поверхности покрытия и усложняет его заключительную механическую обработку. Микроструктура покрытия, полученного на оптимизированных режимах обработки, показана на рисунке 1. Как видно, слои покрытий представляют собой оплавленный металло - керамический материал. Имеет место достаточно равномерное распределение структурных элементов. Это способствует увеличению износостойкости нанесенных композиций. Заметны следы частиц твердых смазок, образующих покрытия.

Таблица 1 – Результаты исследований по оптимизации дистанции обработки

| Покрытие | Дистанция импульсно-плазменной обработки, м | Показатель пористости, % |
|---|---|---|
| $Al_2O_3$-30%$Cr_2O_3$-12,5%$MoS_2$ (агломер.) | 0,09<br>0,08<br>0,07<br>0,06<br>0,05 | 4,5 – 5,9<br>3,8 – 5,1<br>3,4 – 4,8<br>3,1-4,7<br>Разрушение покрытия |

Указанный элементы структуры наблюдается в виде характерных непротравленных (светлых) оболочек. Сохранение после полета структуры распыляемых композиционных частиц в плазменной струе, соударения их с подложкой и после воздействий импульсами плазмы свидетельствует о том, что состав исходных порошков не претерпевает существенных изменений при формировании покрытий. Это важно для получения необходимых эксплуатационных свойств наносимых материалов, которые дополнительно улучшаются за счет применения импульсно – плазменной обработки покрытий.

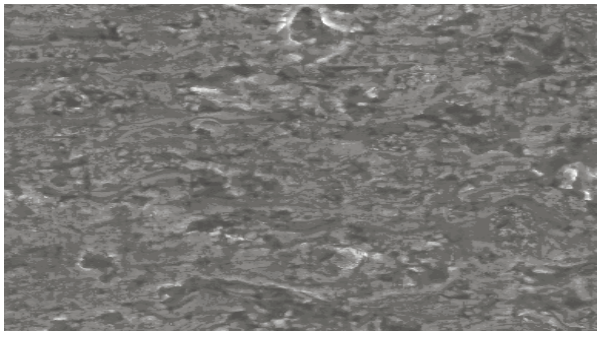


Рисунок 1 – Микроструктура покрытия $Al_2O_3$-30% $Cr_2O_3$-12,5%$MoS_2$, полученного на оптимизированных режимах обработки

К особенностям структуры нанесенных композиций относится усложнение травления ее элементов. Увеличение количества непротравленных участков свидетельствует о наличии упрочненных аморфных или близких к ним нанокристаллических структур с высокой коррозионной стойкостью, практически нерастворимых в кислотных травителях. В соответствии с методическим подходом при изучении свойств покрытий анализировали изменение усредненной микротвердости нанесенных композиций. Согласно рис. 2 микротвердость напыленных материалов после применения импульсно – плазменной обработки возросла в 1,15-1,23 раза, что объясняется более эффективным формированием фаз повышенной прочности с аморфной или близкой к ней нанокристаллической структурой. Эффективность обеспечивается локальным оплавлением и уплотнением слоев покрытий толщиной 30 – 40 мкм при их сверхбыстром охлаждении, а также отсутствием нежелательной рекристаллизации, что обусловлено развитием процессов импульсно - плазменной обработки вглубь покрытия (предыдущие уплотненные слои со сниженной пористостью и возросшей теплопроводностью не нагреваются до критических температур).

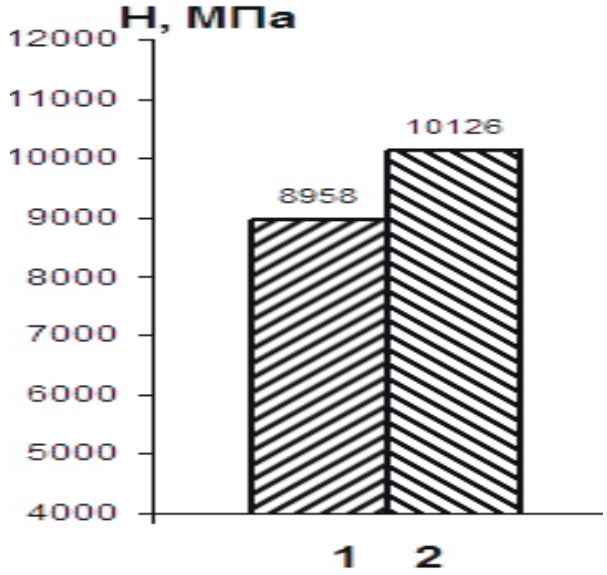



Рисунок 2 – Микротвердость покрытий $Al_2O_3$-30%$Cr_2O_3$-12,5%$MoS_2$:
1– после плазменного напыления; 2– после импульсно – плазменной обработки напыленных материалов

**Выводы**. Проведены исследования и оптимизированы технологические параметры упрочняющей высокоэнергетической обработки напыленных покрытий из материалов на основе многофункциональной оксидной керамики с включениями твердой смазки, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием. Оптимизация выполнена при исследовании процессов структурообразования с оплавлением, уплотнением и высокоскоростным охлаждением покрытий. Критерием оптимизации режимов служила максимальная степень локального оплавления и уплотнения напыленных композиций в отсутствие признаков разрушения покрытий от воздействий импульсами плазмы. Энергия воздействий генерировалась с применением газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнитоплазменный компрессор (МПК) и твердотельного квазистационарного лазерного излучателя. Установлено, что оптимальные дистанции импульсно-плазменной обработки покрытий для для $Al_2O_3$-30% $Cr_2O_3$-12,5%MoS - 0,07м. Об этом свидетельствует стабилизация пористости, желаемого уменьшения которой по критерию оптимизации при дистанциях ниже 0,06 м практически не происходит, что, объясняется кратковременностью тепловых и динамических импульсных воздействий (~ 200 мкс), а также значительным содержанием в покрытиях тугоплавкой фазы, препятствующей возрастанию степени оплавления и уплотнения покрытий. Кроме того, при дистанциях 0,05 м для $Al_2O_3$-30% $Cr_2O_3$-12,5%Mo наблюдается разрушение покрытий с развитием макротрещин. Оптимальные плотности мощности излучения (W) при обработке композиций для $Al_2O_3$-30%$Cr_2O_3$-12,5%$MoS_2$, полученными методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием - в пределах (5,0 –7,0) х $10^5$ Вт/см$^2$. Об этом свидетельствует динамика возрастания степени оплавления,

уплотнения обработанных композиций и соответствующего изменения пористости, желаемого уменьшения которой (по критерию оптимизации) при W больше 6,0 и 7,0х $10^5$ Вт/см$^2$ практически не происходит. Снижение эффективности теплоотдачи объясняется значительным содержанием в покрытиях тугоплавкой и твердой оксидной фазы (более 80%), препятствующей возрастанию степени оплавления и уплотнения покрытий. Кроме того, при дальнейшем увеличении W наблюдается нежелательное тепловое разрушение поверхностей обрабатываемых материалов.

## Список литературы

1. *Оковитый В.А.* Модификация плазменных износостойких покрытий импульсным лазером/ Оковитый В.А., Пантелеенко Ф.И., Шевцов А.И., Девойно О.Г., Пантелеенко А.Ф., Оковитый В.В. //Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение.- Брест, 2009.-Вып.4(58).- С.49-53.

2. *Оковитый В.А.* Исследование процессов модификации плазменных износостойких плазменных покрытий импульсно-плазменной обработкой / Оковитый В.А., Пантелеенко Ф.И., ИльющенкоА.Ф., Шевцов А.И., Асташинский В.М., Пантелеенко А.Ф., Оковитый В.В., //Вестник Белорусского национального технического университета. БНТУ- Минск, 2009.- Вып.5.- С 38-43 .

3. *Оковитый В.А.* Плазменные износостойкие покрытия с включением твердой смазки / Оковитый В.А // Сварочное производство-М., 2002. - №6. -С.41-43

4. *Okovity V.* Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ Okovity V // J. Welding International.- 2003.-vol.16, № 11.- P. 918-920.

5. *Оковитый В.А.* Триботехнические испытания образцов аморфизированных плазменных композиционных покрытий с включением твердой смазки / Оковитый В.А., Шевцов А.И., Ильющенко А.Ф., Девойно О.Г., Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.В. //Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение.- Брест, 2008.-Вып.- С.2-6.

# RESEARCH OF PROCESSES AND OPTIMIZATION THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PULSE-PLASMA TREATMENT PLASMA COATINGS OF MULTIFUNCTIONAL MATERIALS BASED ON OXIDE CERAMICS

**Panteleenko F. I.**[1], D.Sc. (Engineering), First Vice-Rector, e-mail: panteleyenkofi@mail.ru
**Okovity V. A.**[1], C.Sc. (Engineering), e-mail: okovas@gmail.com
**Devoino O. G.**[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: scvdmed@bntu.by
**Astashinsky V. M.**[2], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: ast@telegraf.by
**Okovity V. V.**[1], e-mail: vasil_ok@inbox.ru

[1]Belarussian National Technical University, 65, avenue Nezavisimosty, Minsk, 220013, Belarus
[2]Heat And Mass Transfer Institute, 15, P. Brovka Str., Minsk 220072, Belarus

**Abstract:** The paper deals with the process followed by the high-energy plasma treatment of coating materials based on multi-functional oxide ceramics. By varying the process parameters of impulse - plasma treatment varied influences distance pulses and their total number. These process parameters affect the thickness of the treated coating layers. For wear resistant coatings, which are the subject of studies needed increased cohesive strength and adhesion. Therefore, the total number of pulses should provide reflow and seal the entire coating thickness, which will facilitate obtaining fully hardened structures. Coatings treated plasma jet pulses, obtained by the quasi-stationary gas-discharge type accelerator magneto-plasma compressor.

**Keywords:** plasma spraying, impulse - plasma treatment, multifunctional oxide ceramics, process parameters, wear - resistant coating.

**УДК 621.787: 621.91**

# АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПРОГРАММЫ НАГРУЖЕНИЯ НА ИСЧЕРПАНИЕ ЗАПАСА ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ППД

*К. П. ПЕТРЕНКО, канд. техн. наук, доцент*
*И. В. МИРОШИН, канд. техн. наук, доцент*

Петренко К. П. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева
e-mail: konst.petr@mail.ru
Мирошин И. В. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева
e-mail: imiroshin@rambler.ru

**Аннотация:** В статье представлены результаты аналитических исследований влияния формы участков квазимонотонной деформации на исчерпание запаса пластичности металла поверхностного слоя в процессах поверхностного пластического деформирования. Накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности рассмотрены с позиций технологического наследования. Показана ключевая роль программ нагружения в формировании свойств поверхностного слоя. Установлено, что форма участков программы нагружения оказывает существенное влияние на исчерпание запаса пластичности металла поверхностного слоя.

**Ключевые слова:** Технологическое наследование, поверхностное пластическое деформирование, программа нагружения, напряженно-деформированное состояние, степень исчерпания запаса пластичности, поверхностный слой, упрочнение.

**Введение**

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) относится к числу наиболее эффективных методов поверхностного упрочнения деталей машин. Оно позволяет создавать деформационное упрочнение металла, сжимающие остаточные напряжения и благоприятный профиль шероховатости поверхностного слоя. Это приводит к повышению усталостной прочности и долговечности деталей.

Проектирование технологических процессов упрочняющей механической обработки необходимо осуществлять с позиций технологического наследования (ТН). Многочисленные исследования показали, что эффективная оценка и прогнозирование свойств поверхностного слоя возможны на основе разработанной проф. В. Ю. Блюменштейном механики технологического наследования [1].

Согласно ее основным положениям, в процессах обработки и эксплуатации деталей машин происходит непрерывное накопление деформации и исчерпание запаса пластичности металлом поверхностного слоя. В качестве основных параметров механического состояния используются накопленная степень деформации сдвига $\Lambda$, показатель напряженного состояния $\Pi$, степень исчерпания запаса пластичности $\Psi$.

Внедрение и перемещение режущего или деформирующего инструмента приводит к возникновению очага деформации – локальной области пластического течения в поверхностном слое. В очаге деформации вдоль линий тока происходит накопление деформации, исчерпание запаса пластичности и формирование свойств поверхностного слоя с учетом ТН.

Ключевым элементом механики технологического наследования является программа нагружения (ПН), представляющая собой зависимость накопленной степени деформации сдвига $\Lambda$ от показателя напряженного состояния $\Pi$. ПН состоит из трех участков квазимонотонной деформации (рис. 1), на каждом из которых происходит непрерывное накопление деформации в условиях изменяющегося показателя напряженного состояния. В точках смены знака деформации (ключевых точках) происходит частичное залечивание дефектов и восстановление запаса пластичности металла.

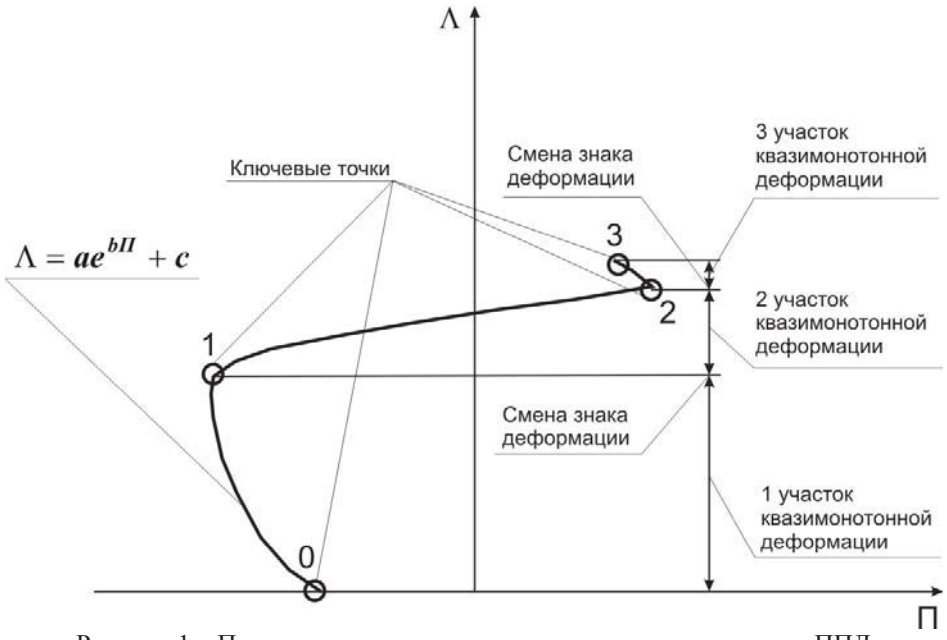



Рисунок 1 – Программа нагружения, характерная для процессов ППД

Степень исчерпания запаса пластичности характеризует накопленную металлом поврежденность и является важнейшей характеристикой механического состояния поверхностного слоя. До деформирования $\Psi = 0$, в момент разрушения $\Psi = 1$. В качестве критерия для аналитического расчета $\Psi$ на основе программ нагружения использовался критерий Калпина-Филиппова в категориях степени деформации сдвига при степенной аппроксимации кривой течения [2]. Под действием ПН в очаге деформации происходит исчерпание запаса пластичности, что приводит к определенному механизму формирования состояния поверхностного слоя.

**Теория**

Анализ показал [3], что на значение степени исчерпания запаса пластичности оказывает влияние форма участков квазимонотонной деформации программы нагружения.

Рассмотрим участки программ нагружения, ключевые точки которых совпадают, а форма отличается:

- $ПН_{пр}$ – программа нагружения, которая проходит через ключевые точки по прямой линии;
- $ПН_{+}$ – более «жесткая» программа нагружения, то есть сдвинутая в область более высоких значений показателя напряженного состояния;
- $ПН_{-}$ – более «мягкая» программа нагружения, сдвинутая в область более низкизх значений показателя напряженного состояния.

Порядок построения «мягких» и «жестких» программ нагружения рассмотрен на рис. 2.

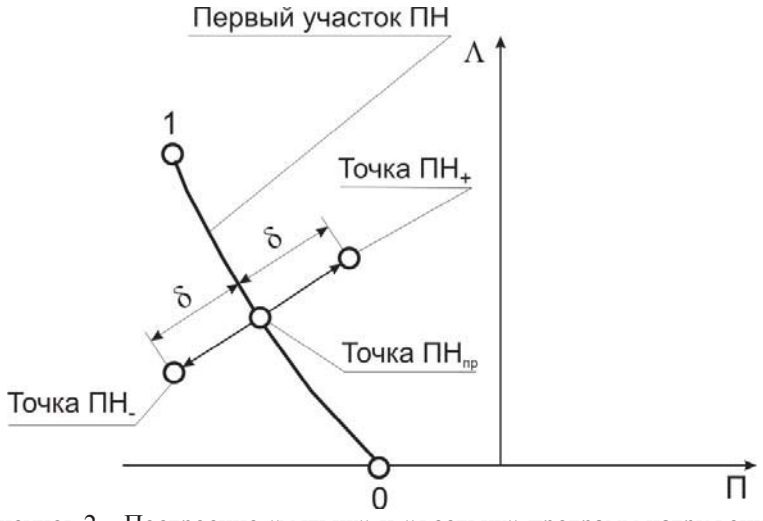



Рисунок 2 – Построение «мягких» и «жестких» программ нагружения

Программа $ПН_{пр}$ определяется по уравнению прямой, проходящей через заданные ключевые точки. Точки программы $ПН_{+}$ получают путем сдвига в направлении увеличения показателя схемы напряженного состояния (в более «жесткую» область). Точки программы $ПН_{-}$ получают путем сдвига в направлении уменьшения показателя схемы напряженного состояния (в более «мягкую» область). Величина сдвига тем больше, чем ближе точка к середине участка программы нагружения. Полученные таким образом модельные программы нагружения показаны на рис. 3.

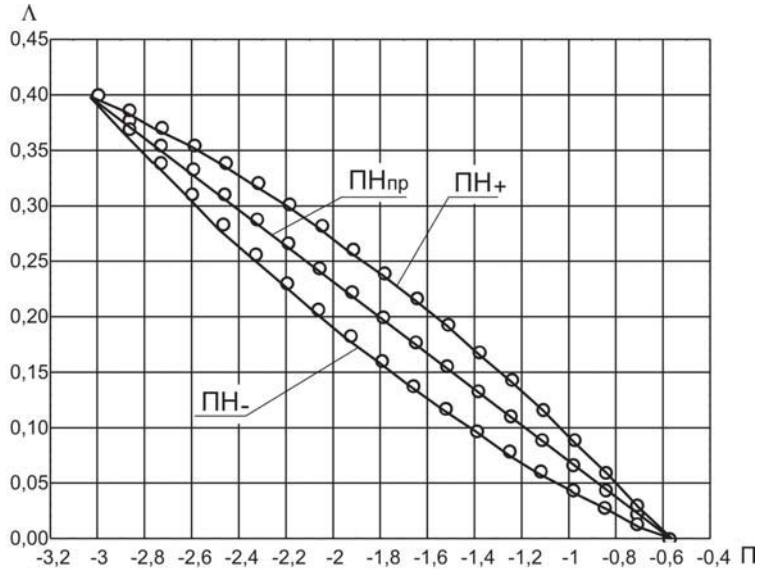



Рисунок 3 – Первый участок квазимонотонной деформации программы нагружения с совпадающими ключевыми точками и несовпадением формы

**Результаты и обсуждение**

Были проведены аналитические исследования влияния формы программы нагружения на показатель исчерпания запаса пластичности. Результаты показаны на рис. 4. По оси абсцисс отложено суммарное отклонение точек соответствующей программы нагружения от точек $ПН_{пр}$. Для каждого отклонения было получено два значения, при этом большее соответствует программе нагружения, сдвинутой в более жесткую область ($ПН_{+}$), а меньшее – в мягкую область (ПН_).

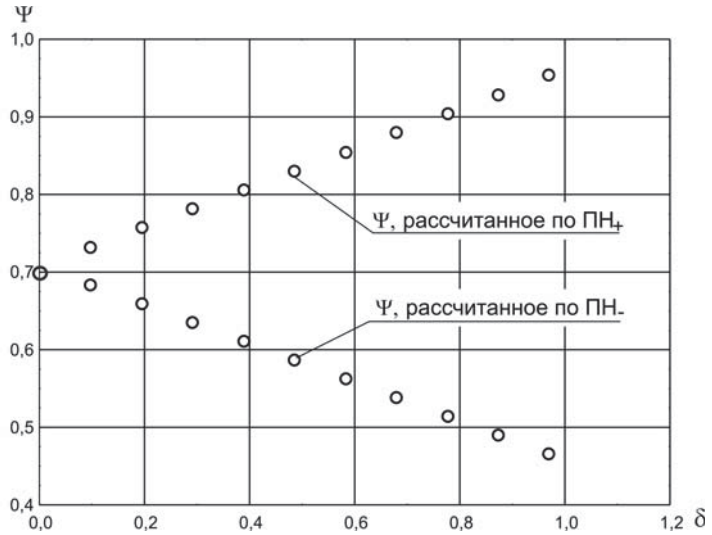



Рисунок 4 – Значения степени исчерпания запаса пластичности при изменении формы программы нагружения

Анализ полученных результатов показывает, что форма участков программы нагружения оказывает существенное влияние на расчетное значение степени исчерпания запаса пластичности. Так, уже при минимальном отклонении программы нагружения ($\delta = 0{,}1$) значение $\Psi$ изменяется более чем на 7 %. При дальнейшем увеличении отклонения $\delta$ разница между

$\Psi$, рассчитанному по программам нагружения $ПН_+$ и $ПН_-$, может увеличиться более чем в два раза.

Изменение степени исчерпания запаса пластичности тем больше, чем больше точек на данном участке программы нагружения, в которых производится расчет мгновенных значений $\Psi$. Количество точек увеличивается при уменьшении подачи при обработке и увеличении горизонтальных размеров очага деформации.

**Выводы**

Таким образом, для достоверной оценки степени исчерпания запаса пластичности описания программы нагружения в категориях ключевых точек недостаточно. Необходима аппроксимация квазимонотонных участков программы нагружения с помощью различных математических моделей. Анализ показал, что для этой цели возможно использование экспоненциальных функций.

## Список литературы

1. *Блюменштейн, В. Ю.* Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин [Текст] / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

2. *Филиппов, Ю. К.* Критерий оценки качества деталей, получаемых холодной объемной штамповкой [Текст] / Ю. К. Филиппов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 2. – С. 3 – 9.

3. *Блюменштейн, В. Ю.* Аналитическое описание программ нагружения на стадиях механической обработки [Текст] / В. Ю. Блюменштейн, К. П. Петренко // Вестник КузГТУ. – 2009. – №6. – С. 77 – 83.

# ANALYTICAL RESEARCH OF LOADING PROGRAM SHAPE ON EXHAUSTION OF PLASTICITY RESOURCE WHILE SURFACE PLASTIC DEFORMING

**Petrenko K. P.** C. Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: konst.petr@mail.ru
**Miroshin I. V.**, C. Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: imiroshin@rambler.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennyaya Street, Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Abstract**: This article presents results of analytical researches on effect of quasi-monotone sections on exhaustion of metal's plasticity resource while surface plastic deforming. Roller burnishing is known to be one of the most effective methods of surface hardening. The technological inheritance mechanics is based on the approach, according to which the machine part's life cycle from the work-piece to fatigue failure is considered to be a single process of exhaustion of metal's plasticity resource, whose stage differ in loading programs. The primal part of loading program in forming properties of surface region is shown. The surface region condition parameters are defined as a result of plastic deformation history. In the present work it is determined that shape of loading program's sections takes a great part in metal's plasticity exhaustion of surface region.

**Keywords:** Technological inheritance, surface plastic deformation, roller burnishing, loading program, exhaustion of metal's plasticity resource, surface region, stress and strain condition, surface hardening.

**УДК 669.716:621.745**

# ОБРАБОТКА РАСПЛАВА КАРБОНАТАМИ ЩЕЛОЧНО ЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ КАК ФАКТОР ВЛИЯНИЯ НА ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ АЛЮМИНИЯ

*М. В. ПОПОВА, доктор техн. наук, профессор,*
*А. Н. ПРУДНИКОВ, доктор техн. наук, профессор,*
*М. А. МАЛЮХ, старший методист*

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
e-mail: m.popova@rdtc.ru, a.prudnikov@mail.ru, malyuh_ma@umu.sibsiu.ru

**Аннотация:** В работе представлены результаты исследований влияния обработки расплава карбонатами щелочноземельных металлов и условий изготовления отливок на температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) алюминия. Показано влияние температуры заливки обработанного расплава на изменение теплового расширения алюминия. Отмечено, что за счет подбора оптимального режима обработки расплава можно добиться снижения ТКЛР алюминия А7 при низких температурах испытания. Установлено, что за счет обработки расплава карбонатами кальция и магния можно значительно снизить ТКЛР алюминия технической чистоты до значений, характерных для сплавов Al–20 % Si, без применения дорогостоящего легирования.

**Ключевые слова:** алюминий, температурный коэффициент линейного расширения, расплав, доломит, карбонаты.

**Введение**

Современная промышленность, в частности, машиностроение нуждается в легких сплавах на основе алюминия для изготовления из них деталей с малой изменяемостью размеров в рабочем интервале температур, т.е. другими словами с малым удельным весом и регулируемым температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) [1]. Малая плотность позволяет уменьшить вес деталей и конструкций и оптимизировать их служебные свойства [2]. Алюминиевые сплавы с низким ТКЛР необходимы для изделий приборной техники, для получения вакуумплотных спаев с различными материалами, а также для обеспечения размерной стабильности деталей. В связи с этим создание конструкционных сплавов на основе алюминия с такими свойствами является актуальной задачей материаловедения, как в нашей стране, так и за рубежом.

Как отмечалось ранее, большой интерес среди веществ, увеличивающих содержание водорода в алюминии, вызывает смесь карбонатов щелочноземельных металлов [3]. В данной работе исследовалась возможность снижения ТКЛР алюминия за счет обработки расплава, которую можно рассматривать как микролегирование. В качестве реагента для обработки расплава был выбран доломит, который представляет собой смесь карбонатов щёлочноземельных металлов $CaCO_3 \cdot MgCO_3$.

Ранее нами [4] было установлено, что применение такой смеси для модифицирования алюминия и его сплавов существенно улучшает их физико-механические свойства. В связи с этим, в продолжение работы были более подробно исследованы такие параметры приготовления сплава, как температура и время обработки расплава, температура заливки. Поскольку эффективность обработки расплава доломитом существенно зависит от этих параметров, главным было определение оптимального их сочетания, позволяющего получить стабильное снижение ТКЛР алюминия.

**Методика экспериментального исследования**

Для исследования перечисленных параметров приготовления сплава производили выплавку в закрытой лабораторной печи сопротивления в алундовом тигле. После расплавления алюминия расплав обрабатывали смесью карбонатов щелочноземельных металлов $CaCO_3 \cdot MgCO_3$, взятых в равном соотношении. В данной работе также исследовалось влияние степени измельчения фракции доломита на тепловое расширение алюминия. Поэтому проводилась обработка сухим доломитом крупной фракции (20-30 мм), а также влажным доломитом мелкой фракции (3-5 мм), предварительно смоченным в воде. Смесь вводили в расплав в количестве 1 – 7 % от массы расплава и обработку расплава проводили в течение 3 – 15 минут при температуре, на 50 ÷ 250 ºС превышающей температуру плавления алюминия, (710 ÷ 910 ºС). По окончании обработки с поверхности удаляли шлак и проводили заливку в алюминиевый кокиль со следующих температур: 950-820

ºС; 740-720 ºС; 670-660 ºС. Из полученных слитков изготавливали образцы для дилатометрического исследования. ТКЛР определяли с помощью дифференциального оптического фоторегистрирующего дилатометра системы Шевенара, погрешность определения составляла ± 0,1 · $10^{-6}$ град $^{-1}$.

**Результаты и обсуждение**

Сравнение полученных значений ТКЛР алюминия, обработанного доломитом и алюминия без обработки – показатель возможности снижения ТКЛР алюминия за счет различных технологических приемов, в данном случае благодаря обработке расплава.

На рисунках 1 и 2 приведено сравнение значений ТКЛР, полученных после обработки сухим доломитом крупной фракции и влажным доломитом мелкой фракции. Из представленных данных видно, что обработка расплава доломитом приводит к значительному понижению ТКЛР алюминия во всем температурном интервале испытания, независимо от его фракции. Как видно из графиков, наибольшее снижение ТКЛР алюминия обработанного сухим доломитом наблюдается в интервале температур испытания 50 – 300 °С. В случае обработки расплава влажным доломитом мелкой фракции, наибольшее снижение ТКЛР алюминия наблюдается в интервале температур испытания 300 – 450 °С.

Анализируя результаты, полученные при исследовании образцов из алюминия, обработанного сухим доломитом крупной фракции (рисунок 1), можно сделать вывод о том, что наименьшие значения ТКЛР во всем интервале температур испытания имеют образцы, полученные после заливки расплава при температурах 670 и 820 °С. В этом случае может быть получено значение $\alpha_{300}$ = 8,7·$10^{-6}$ град$^{-1}$ после заливки с 670 °С, а после заливки с 820 °С ТКЛР снижается до $\alpha_{200}$ = 4,2·$10^{-6}$ град $^{-1}$.

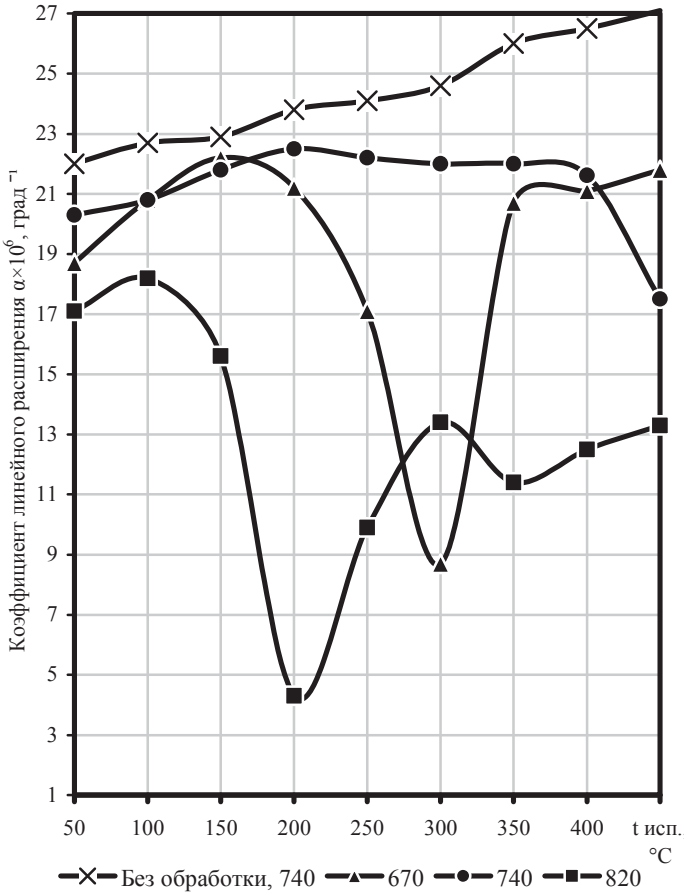



Рисунок 1 – Влияние температуры заливки на линейное расширение алюминия А7 (обработка расплава сухим доломитом фракцией 20-30 мм)

После обработки расплава влажным доломитом мелкой фракции (рисунок 2) наблюдается резкое снижение ТКЛР в интервале температур испытания 300-400 °С образцов, залитых при температурах 660 и 720 °С. В этом случае может быть получено значение $\alpha_{350}$= 9,9·$10^{-6}$ град $^{-1}$ после заливки с 720 °С, после заливки с 660 °С ТКЛР снижается до $\alpha_{350}$= 1,3·$10^{-6}$ град$^{-1}$.

При создании легких сплавов с требуемым значением ТКЛР особое внимание уделяется легированию кремнием [5]. Объяснение этому, в первую очередь, базируется на том, что кремний имеет более высокую температуру плавления, малую плотность и значительно меньший ТКЛР по сравнению с алюминием [6–9]. Поэтому следующим шагом было сравнение теплового расширения полученного сплава и сплавов Al-Si.

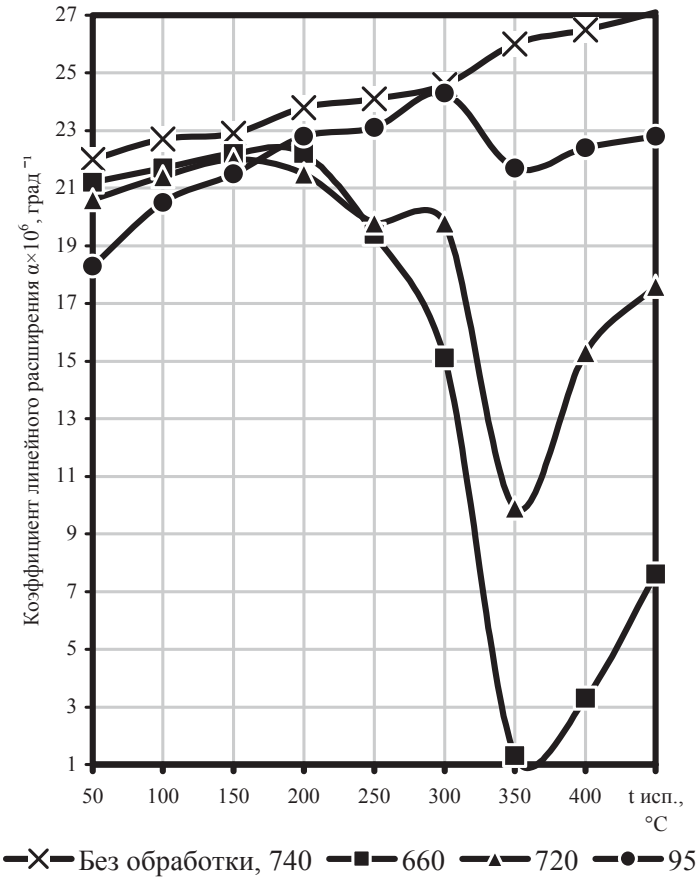



Рисунок 2 – Влияние температуры заливки на линейное расширение алюминия А7 (обработка влажным доломитом фракцией 3-5 мм)

На рисунке 3 представлены результаты дилатометрических исследований сплавов Al-Si в сравнении со значениями ТКЛР алюминия А7, обработанного крупным доломитом и залитого с температуры 820 ºС.

Из представленных данных видно, что в интервале низких температур испытания наблюдается совпадение значений ТКЛР исследуемого сплава со значениями ТКЛР сплава Al-20%Si. В области высоких температур наблюдается значительное снижение теплового расширения полученного сплава в сравнении со значениями ТКЛР сплава Al-30%Si.

Графики демонстрируют, что ТКЛР алюминия, обработанного доломитом составляет $\overline{\alpha}_{50\text{-}150} = 17\cdot10^{-6}$ град $^{-1}$, тогда как $\overline{\alpha}_{50\text{-}150}$ алюминия обычного приготовления равен $23\cdot10^{-6}$ град $^{-1}$. Следует отметить, что значения алюминия $\overline{\alpha}_{50\text{-}150} = 17\cdot10^{-6}$ град $^{-1}$ соответствуют значениям ТКЛР сплава Al-20%Si.

**Выводы**

Подтверждено, что обработка расплава карбонатами щелочноземельных металлов, не зависимо от фракции, благотворно влияет на величину ТКЛР алюминия. Оптимальной температурой заливки, обеспечивающей снижение ТКЛР алюминия, является $t_{зал}$ = 820 ºС.

Установлено, что в области температур испытания 50 ÷ 100 °С, *что очень важно для приборной техники*, возможно получить значения ТКЛР алюминия, равнозначные значениям ТКЛР сплава Al-20%Si. В этом случае $\alpha_{50} = 17{,}1\cdot10^{-6}$ град$^{-1}$ и $\alpha_{100}=18{,}2\cdot10^{-6}$ град $^{-1}$, что подтверждает возможность снижения ТКЛР алюминия без применения дорогостоящего легирования.

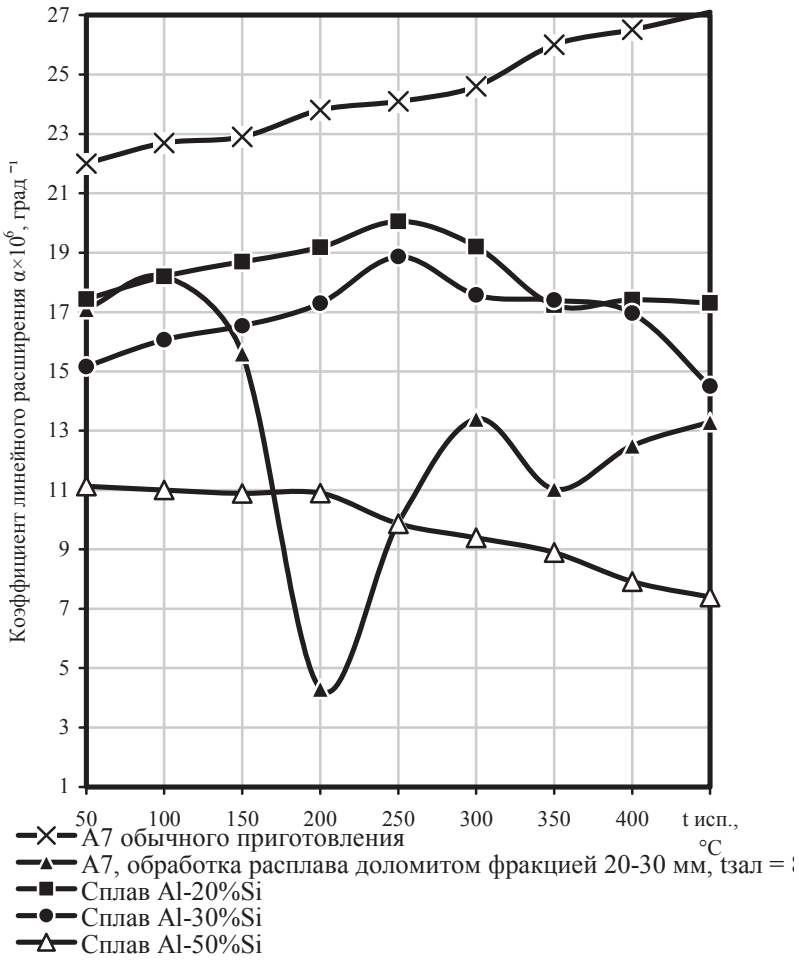



Рисунок 3 – Линейное расширение алюминия А7 и сплавов Al-Si

## Список литературы

1. *Афанасьев В.К.* Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расширением для космической техники / В.К. Афанасьев, М.В. Попова // Металлургия машиностроения. – 2012. – № 6. – С. 8-13.

2. *Polmear I. J.* Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals. - Amsterdam: Elsevier Ltd, 2005.

3. *Афанасьев В. К.* Влияние обработки расплава водородосодержащими веществами на тепловое расширение алюминия / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, М.А. Старостина (М.А. Малюх), Н.В. Кривичева // Металлургия машиностроения. – 2011. – № 3. – С. 30-33.

4. Патент Россия № 2136773, C22C1/06, C22F1/043, C22B9/10. Способ модифицирования алюминия и его сплавов / Попова М.В., Герцен В.В., Доронченко А.В., Афанасьев В.К., СибГИУ, приоритет 05.03.98 г., опубликован 10.09.99 г.

5. *Афанасьев В.К.* О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.А. Старостина (М.А. Малюх) // Металлургия машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 23-26.

6. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976.– 1008 с.

7. *Строганов Г.Б.*, *Ротенберг В.А., Гершман Г.Б.* Сплавы алюминия с кремнием. – М.: Металлургия, 1977. – 271 с.

8. *Альтман М.Б.* Структура и свойства легких сплавов / М.Б. Альтман. – М.: Наука, 1971.–218 с.

9. Алюминий: свойства и физическое металловедение: справ. изд.: пер. с англ. / Под ред. Дж.Е. Хэтча. – М.: Металлургия, 1989. – 422 с.

# MELT PROCESSING ALKALINE EARTH METAL AS A FACTOR OF INFLUENCE ON THE THERMAL EXPANSION OF THE ALUMINUM

**Popova M. V.,** Dr. Sc. (Engineering), Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru
**Prudnikov A. N.,** Dr. Sc. (Engineering), Professor, e-mail: a.prudnikov@mail.ru
**Malyuh M. A.,** starshiy metodist, e-mail: malyuh_ma@umu.sibsiu.ru

Siberian state industrial university, 42 Kirov str., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

**Abstract:** Modern industry , in particular , machinery needs light alloys based on aluminum for the production of these parts with low variability in size of the operating temperature range, i.e. in other words with a low specific weight and adjustable temperature coefficient of linear expansion (TCLE). Low density can reduce the weight of parts and assemblies and to optimize their service properties. Aluminum alloys with a low coefficient of linear expansion are required for manufacturing the instrument art , for vacuum- junctions with different materials as well as to ensure the dimensional stability of components. In this regard, the creation of structural aluminum-based alloys with the properties of materials is an important task , both in our country and abroad.

The results of studies of the effect melt processing alkaline earth metal carbonate and the conditions of manufacture of castings for the TCLE of aluminum. The effect of pouring temperature of the melt processed to change the thermal expansion of aluminum. It is noted that by choosing an optimal treatment regimen can achieve lower melt TCLE aluminum A7 at low test temperatures. It is found that by treating the melt with carbonates of calcium and magnesium can be significantly reduced coefficient of linear expansion of aluminum of technical purity to values typical for the alloys Al-20% Si, without using an expensive alloying.

**Keywords:** aluminum, temperature coefficient of linear expansion, melt, dolomite, carbonates.

**УДК 620.193.23**

# КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АЛЮМИНИЙ-СТАЛЬ*

*Д. В. ПРОНИЧЕВ[1], канд. техн. наук, доцент,*
*Л. М. ГУРЕВИЧ[1], доктор техн. наук, доцент,*
*М. Д. ТРУНОВ[1], магистр техники и технологии,*
*В. М. ЯСТРЕБОВ[1], магистр техники и технологии*
*([1]ВолгГТУ, г. Волгоград, Россия)*

Гуревич Л. М. – 400005, г. Волгоград, проспект имени В.И. Ленина, 28,
Волгоградский государственный технический университет,
e-mail: mv@vstu.ru

**Аннотация:** В данной работе исследована коррозионная стойкость стале-алюминиевого слоистого металлического композита. Материал был получен сваркой взрывом при реализации различных значений энергии $W_2$. Рассмотрено влияние энергии $W_2$ а также времени воздействия коррозионной среды на потерю массы образцов, относительную протяженность, глубину и скорость коррозионного поражения. Установлено, что первичными очагами коррозионного разрушения являются образующиеся в ходе сварки оплавы.

**Ключевые слова**: алюминий, сталь, слоистый композит, сварка взрывом, коррозионная стойкость.

**Введение**

Применение композиционного материала алюминий-сталь в химической, атомной промышленности и судостроении [1, 2] предусматривает работу в условиях воздействия различных коррозионных сред. Наиболее распространёнными коррозионными средами для композита алюминий-сталь, применяемого при создании судов и наземных транспортных систем являются вода (в том числе морская), влажный воздух и антиобледенительные растворы, при воздействии которых может развиваться электрохимическая коррозия, обусловленная значительной разницей электрохимических потенциалов алюминия и стали [3, 4].

В то же время практически отсутствуют данные о влиянии на интенсивность коррозионного поражения биметалла алюминий-сталь, сваренного взрывом, параметров его получения, определяющих формирование структурной неоднородности на границе соединения основных слоёв материала [5]. Поскольку сварка взрывом является одним из наиболее применяемых способов получения слоистых композиционных материалов системы алюминий-сталь, целью данной работы было установления влияния параметров сварки взрывом и структурного состояния на коррозионную стойкость композита Ад1+Ст3 в условиях воздействия морской воды и влажного морского воздуха.

**Материалы и методика исследований**

Для проведения исследования был получен сваркой взрывом по угловой схеме биметалл Ад1+Ст3, что впозволило реализовать 4 типа структур (табл. 1):

Таблица 1 – Типы структур в образцах исследуемого биметалла АД1-Ст3

| Тип структуры | I | II | III | IV |
|---|---|---|---|---|
| Энергия, расходуемая на пластическую деформацию, $W_2$, МЖд/м$^2$ | 1,1-,14 | 1,4-1,6 | 1,6-1,8 | 1,8-2,1 |
| Относительная протяженность оплавов, % | 0 | 2-5 | 15-25 | 65-75 |

Образцы каждого типа подвергались коррозионным испытаниям двух типов:

имитация воздействия морской воды (ГОСТ 9.913-90) при полном погружении в 3% раствор хлористого натрия с добавлением перекиси водорода в течении 90 суток;

имитация воздействия влажной приморской атмосферы (ГОСТ 9.913-85) с циклическим (10 мин. погружения/ 50 мин. на воздухе) смачиванием образцов в 3-% водном растворе хлористого натрия с добавлением перекиси водорода в течение 90 суток.

Испытания проводились при температуре 18-25 °С, каждые 15 суток образцы извлекались из коррозионной среды для оценки коррозионного поражения и изучения микроструктуры.

Коррозионное воздействие оценивалось по изменению массы образца, скорости протекания

и глубине коррозионного поражения. Взвешивание образцов проводилось на электронных весах с точностью 0,1 г.

Скорость коррозии оценивали по следующей методике:

$$K = \frac{\Delta m}{\tau}, \quad (1)$$

где $\Delta m$ – потеря массы;

$\tau$ – время воздействия коррозионной среды.

Потеря массы вычисляется по формуле:

$$\Delta m = \frac{m_o - m_1}{S}, \quad (2)$$

где $m_0$ – масса образца до испытания, *г*;

$m_1$ – масса образца после испытания и удаления продуктов коррозии, *г*;

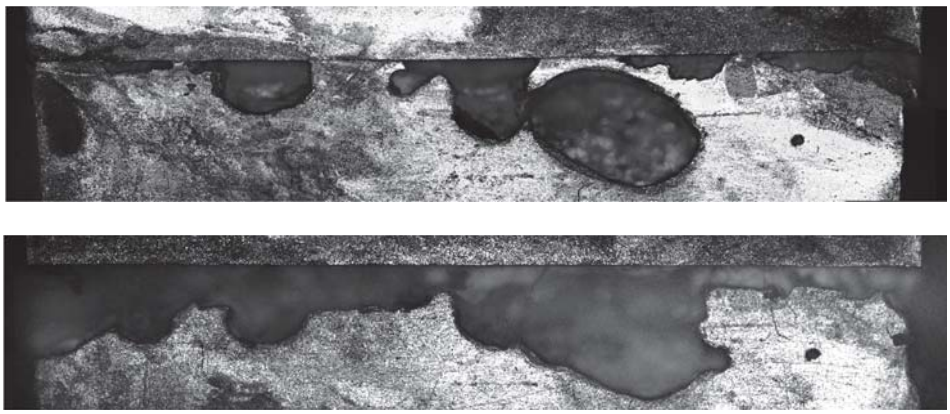
$S$ - площадь поверхности образца, *м*$^2$.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Olympus BX-65 с применением программного обеспечения обработки цифровых изображений AnalySYS.

**Результаты и обсуждение**

Исследования образцов после испытаний показали, что начальными очагами разрушения становятся включения оплавленного металла, образовавшиеся при сварке взрывом, далее, как правило, в разрушение вовлекается алюминий в околошовной зоне, прилегающей к границе соединения со сталью. Наиболее интенсивно это проявляется при циклическом погружении, воспроизводящем действие влажной атмосферы (рис. 1).

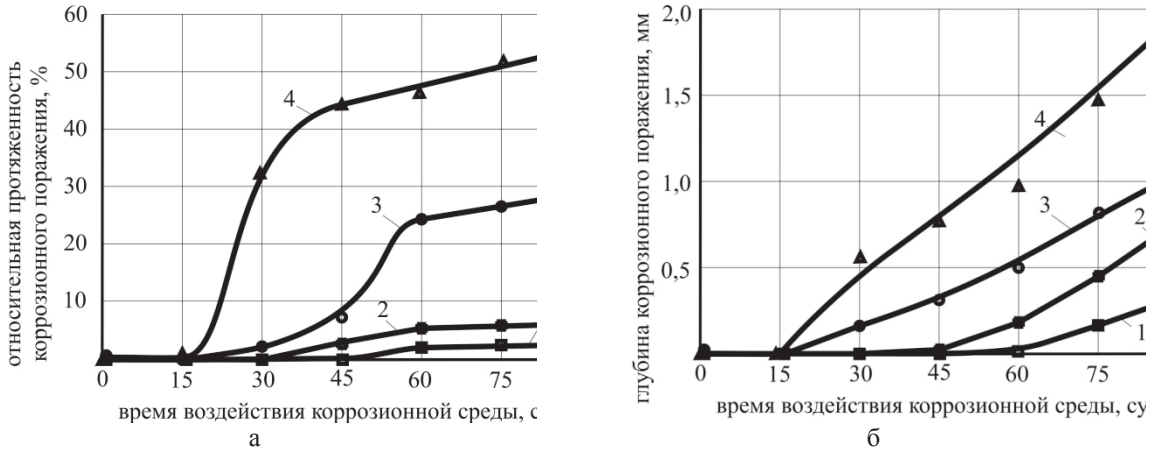
Глубина коррозионного поражения (рис. 2, 3) зависит только от длительности воздействия и независимо от среды может достигать 2 мм, что может значительно ослабить элементы конструкции из сваренного взрывом биметалла. Площадь поражения в значительной мере определяется не только временем воздействия но и коррозионной средой: при погружении в морскую воду она достигает 55% через 90 дней испытаний, а при воздействии влажного воздуха коррозионное поражение распространяется на всю границу соединения.



*а*

*б*

Рисунок 1 – Коррозионное поражение границы раздела в биметалле АД1+Ст3 после 15 (а) и 90 (б) дней воздействия коррозионной среды ($W_2$=1,8-2,1 МЖд/м$^2$)

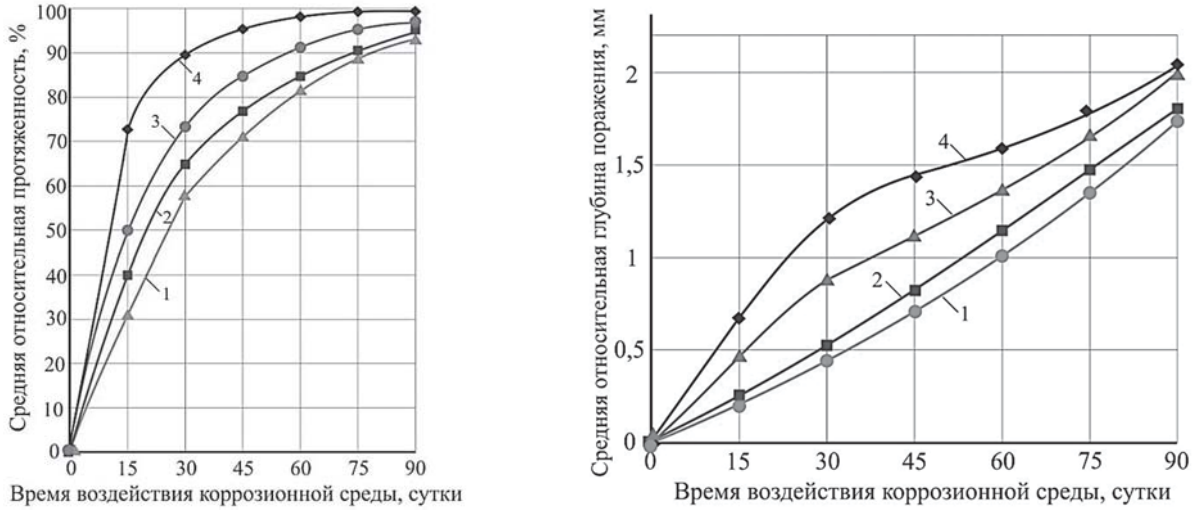



а б

Рисунок 2 – Зависимость относительной протяженности (а) и глубины (б) коррозионного поражения на границе соединения АД1-Ст3 от времени воздействия коррозионной среды, имитирующей морскую воду: 1 – $W_2$ = 1,2–1,4 МДж/м$^2$; 2 – $W_2$ = 1,4–1,6 МДж/м$^2$; 3 –$W_2$ = 1,6–1,8 МДж/м$^2$; 4 – $W_2$ = 1,8–2,1 МДж/м$^2$

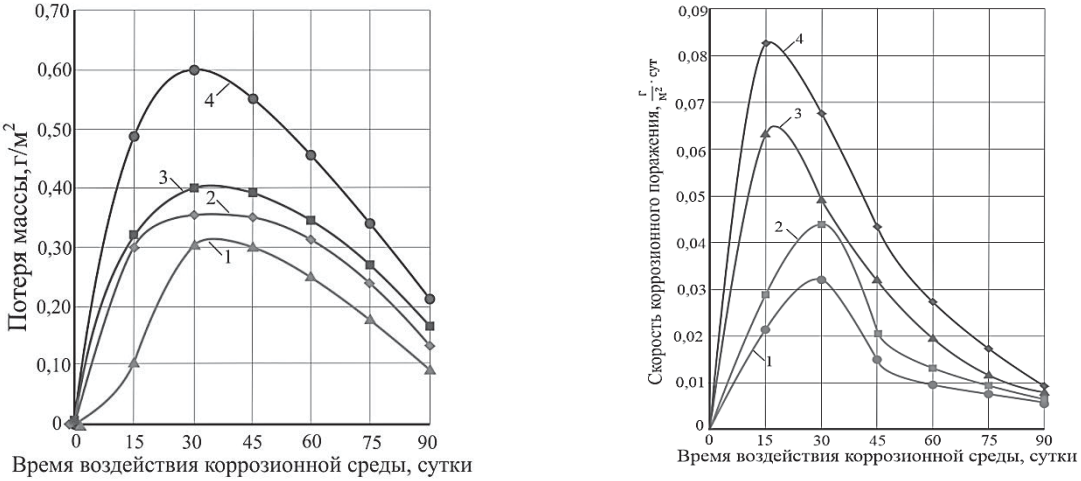
Измерение потери массы и скорости коррозионного поражения (рис.4) показали, что потеря массы зависит от времени воздействия коррозионной среды и условий сварки взрывом. Максимума она достигает на 30–45 день эксперимента, когда замедляется рост относительной протяженности пораженных участков, после 60 дней происходит замедление потери массы, что связано с тем, что на стали оседает все больше продуктов коррозии при катодном процессе. Увеличение энергии $W_2$ с 1,1 до 2,1 МДж/м$^2$ приводит к ускорению потери массы в отдельные периоды времени в два раза.

Скорость коррозии (рис. 3 б) так же достигает максимума на 30-й день эксперимента и может составлять до 0,08 (г/м$^2$) сут. при $W_2$=1,8-2,1 МДж/м$^2$ к 90-му дню эксперимента скорость коррозии падает до 0,01 (г/м$^2$) сут. не зависимо от условий сварки.




а б

Рисунок 3 – Зависимость относительной протяженности (а) и глубины (б) коррозионного поражения на границе соединения АД1-Ст3 от времени воздействия коррозионной среды, имитирующей влажную приморскую атмосферу: $W_2$: 1 – 1,1-1,4 МДж/м$^2$; 2 –1,4-1,6 МДж/м$^2$; 3 – 1,6-1,8 МДж/м$^2$; 4 – 1,8–2,1 МДж/м$^2$




а б

Рисунок 4 – Зависимость потери массы (а) и скорости коррозионного поражения (б) в композите АД1-Ст3 от времени воздействия влажного морского воздуха при различных $W_2$: 1 – 1,1-1,4 МДж/м$^2$; 2 –1,4-1,6 МДж/м$^2$; 3 – 1,6-1,8 МДж/м$^2$; 4 – 1,8-2,1 МДж/м$^2$

**Выводы**

1. При длительном воздействии коррозионной среды, имитирующей воздействие морской воды и приморского воздуха, на границе соединения в биметалле АД1+Ст3 интенсивно развивается коррозионное поражение. Наименьшей коррозионной стойкостью обладают возникающие при сварке взрывом участки оплавленного металла. Как следствие параметры СВ оказывают значительное влияние на коррозионную стойкость композита во влажной среде.

2. Первичными очагами коррозионного разрушения являются формирующиеся при сварке взрывом на завышенных режимах локальные участки оплавленного металла, что свидетельствует о большей их электроотрицательности по сравнению с алюминием. Разрушение протекает за счет анодного процесса на алюминии со скоростью до 0,08 (г/м$^2$) сут, при этом растут, как площадь поражения, так и глубина, которые могут достигать 100% и 2 мм, соответственно.

3. Продолжительное воздействие коррозионной среды (90 суток) на не защищенный лакокрасочными покрытиями биметалл АД1+Ст3 вызывает образование очагов коррозионного поражения глубиной до 2 мм, что может значительно снизить его работоспособность.

## Список литературы

1. *Трыков Ю. П., Гуревич Л. М., Шморгун В. Г.* Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов. – М. : Металлургиздат, 2004.

2. *Trethewey K. R., Little G. T.* Explosion-bonded transition joints for structural applications //Construction and Building Materials. – 1989. – Т. 3. – №. 2. – С. 64-72.

3. Коррозионная стойкость оборудования химических производств: Способы защиты оборудования от коррозии / Под ред. Б. В. Строкана - Л.: Химия, 1987. 280 с.

4. *Кемхадзе, В. С.* Коррозия и защита металлов во влажных субтропиках. – М.: Наука, 1983. – 107 с.

5. *Гуревич, Л. М.* Исследование влияния режимов сварки взрывом и термической обработки на структуру и свойства биметалла АД1+сталь Ст3 / Л. М. Гуревич, Д. В. Проничев, А. Ф. Трудов, Ю. П. Трыков, М. Д. Трунов // Известия ВолгГТУ, сер. «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении», №9, 2014. - С.17-31.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00158)

## CORROSION RESISTANCE OF ALUMINIUM/STEEL LAMINATED METAL COMPOSITES

**Pronichev D. V.**[1], C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: avatar@mail.ru
**Gurevich L. M.**[1], D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: leongur666@gmail.com
**Trunov M. D.**[1], M.Sc. (Engineering), e-mail: Mikhail.trunov@gmail.com
**Yastrebov V. M.**[1], M.Sc. (Engineering), e-mail: mv@vstu.ru

[1]Volgograd State Technical University, 28, Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russia

**Abstract:** In this study corrosion resistance of Steel/Al laminated metal composite was investigated. The composite was obtained via explosion welding in a range of $W_2$ energy. The impacts of $W_2$ and the exposure time of the corrosive environment on the weight loss of specimen, relative length, depth and the speed of corrosion influence were observed. The initial corrosion was found to occur in the regions with molten zones in the bond area.

**Keywords**: aluminum, steel, laminated metal composite, explosion welding, corrosion resistance.

**УДК 621.768.011**

# ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДТЦО

*А. Н. ПРУДНИКОВ, доктор техн. наук, профессор*
*М. В. ПОПОВА, доктор техн. наук, профессор*
*В. А. ПРУДНИКОВ, аспирант*
*(СибГИУ, г. Новокузнецк, Россия)*

Прудников А.Н. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: a.prudnikov@mail.ru

**Аннотация:** Приведены результаты влияния термической обработки: нормализации и отпуска на удельное электрическое сопротивление листовой горячекатаной низкоуглеродистой стали Ст3пс, изготовленной с применением режима деформационной термоциклической обработки (ДТЦО). ДТЦО заключалась в предварительной термоциклической прокатке (5 циклов со степенью обжатия 10-15 % в каждом цикле и охлаждением до температур ниже $A_{r1}$). Нормализацию и отжиг проводили в интервале от 100 до 900 °С с шагом 100 °С в течение 1 ч. Показана возможность снижения величины удельного электрического сопротивления горячекатаной стали , изготовленной с применением режима ДТЦО, за счет использования последующей нормализации при 700 °С в среднем на 10 %, а за счет отжига – не более 5 %. Общий уровень снижения удельного электрического сопротивления горячекатаной стали Ст3пс за счет использования режима ДТЦО и последующей нормализации при 700 °С в течение 1 ч составляет более 12 %.

**Ключевые слова**: сталь, структура, термоциклическая прокатка, отжиг, нормализация, удельное электрическое сопротивление.

**Введение**

В области электротехнического материаловедения низкоуглеродистую сталь можно причислить к наиболее доступным и дешевым материалам, обладающим хорошими механическими характеристиками при разрыве. Однако ее использование сдерживается повышенным удельным электрическим сопротивлением по сравнению со сплавами меди и алюминия. Известно, что для структурно чувствительных свойств, в число которых наряду с механическими характеристиками входит удельное электрическое сопротивление, эффективно совместное воздействие температуры и деформации [1,2]. К таким воздействиям можно отнести деформационную термоциклическую обработку (ДТЦО), представляющую собой термоциклическую обработку, совмещенную с различными видами деформации в области низких или высоких температур. Такая комплексная обработка приводит к интенсификации диффузионных процессов, протекающих при заданных колебаниях температуры с приложением напряжений и деформаций, накоплению структурных изменений, происходящих в циклах и связанных с объемными эффектами фазовых превращений, разницей в теплофизических характеристиках фаз и др. В конечном итоге эти процессы позволяют сформировать оптимальную структуру и улучшить физические и механические свойства сталей, чугунов, алюминиевых сплавов и других материалов [3-6]. Резервом снижения удельного электрического сопротивления может служить последующая термическая обработка для получения более равновесной структуры с уменьшенным количеством кристаллографических дефектов и пониженным уровнем внутренних напряжений [7], в первую очередь нормализация и отжиг. Поэтому целью работы являлось исследование воздействия различных режимов нормализации и отжига на удельное сопротивление горячекатаной стали Ст3пс, изготовленной с применением ДТЦО.

**Материал и методика экспериментального исследования**

В качестве материала исследования была взята низкоуглеродистая сталь обыкновенного качества Ст3пс, выплавленная на ОАО «НКМК» (г. Новокузнецк). Химический состав стали, определенный на спектрометре ARL4460 приведен в таблице.

Таблица 1 – Химический состав обрабатываемой стали Ст3п**с**

| Марка стали | № плавки | Содержание элементов, % (вес.) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | Mn | Si | P | S | Cr | Cu | Ni |
| Ст3пс | 060886 | 0,19 | 0,54 | 0,07 | 0,013 | 0,028 | 0,3 | 0,07 | 0,03 |

Для прокатки листа из слитка вырезали сляб размером 165×500×1800 мм. ДТЦО заключалась в термоциклической прокатке на листопрокатном стане 500 (ОАО «НКМК») в количестве 5 циклов. Один цикл прокатки заготовок включал нагрев до 1300 °С, выдержка 2-2,5 ч, обжатие 10-15 % и охлаждение на воздухе до температуры ниже $A_{r1}$. Причем в 1-ом и 3-ем циклах охлаждение проводили до 500-550 °С, а в остальных циклах – до 50-100 °С. Толщина полосы по циклам изменялась следующим образом: 165→140→120→110→100→90 мм и далее до толщины листа 5 мм по промышленной технологии. Нормализацию и отжиг листовых образцов проводили в печах сопротивления типа СНОЛ. Для исследования микроструктуры стали использовали оптический микроскоп ЛабоМет-И1, а для измерения электрического сопротивления применяли двойной мост Томсона (NORMA M88). Образцы для измерения электрического сопротивления имели размеры 5×5×100 мм. Погрешность метода измерения сопротивления составляла $0{,}05 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

**Результаты и обсуждение**

Известно из предыдущих работ авторов [8,9], что указанный выше режим ДТЦО для стали Ст3пс приводит к измельчению структуры и уменьшению объемной доли перлита в горячекатаной стали и снижению величины удельного сопротивления на 3-5 %. Дальнейшим резервом уменьшения удельного электрического сопротивления может являться последующая термическая обработка, приводящая к получению в стали более равновесного структурного состояния по сравнению с деформированным. Поэтому было изучено влияния температуры нормализации и отжига на величину удельного сопротивления горячекатаной стали Ст3пс. Температура обработки менялась в интервале от 100 до 900 °С с шагом 100 °С и временем выдержки 1 ч. Результаты определения удельного сопротивления образцов из горячекатаной стали Ст3пс в нормализованном и отожженном состояниях приведены на рис.

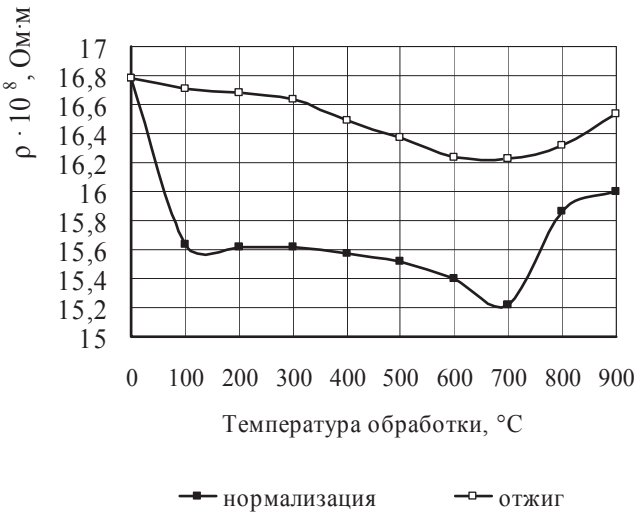



Рисунок – Влияние температуры отжига и нормализации на удельное электрическое сопротивление горячекатаной стали Ст3пс, изготовленной с применением ДТЦО

Установлено, что с увеличением температуры обработки для обоих режимов как нормализации, так и отжига величина удельного электрического сопротивления снижается до температуры 700°С. Причем у нормализованных образцов удельного электрическое сопротивление на 6 % ниже, чем у отожженных и его абсолютная величина составляет $15{,}22 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Увеличение удельного электрического сопротивления стали с повышением температуры нормализации и отжига до 900 °С может быть связано с коагуляцией при этих температурах цементита, находящегося в перлитной составляющей после ДТЦО в дисперсном виде.

Дальнейшее увеличение времени нормализации при 700°С до 3, 5 и 10 ч не оказывает существенного влияния величину удельного электрического сопротивления горячекатаной стали, изготовленной с ДТЦО, хотя и сохраняет тенденцию к его снижению – 15,19, 15,17 и

$15{,}03 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Таким образом общий уровень снижения удельного электрического сопротивления горячекатаной стали за счет использования режима ДТЦО и последующей нормализации при 700 °С в течение 1-10 ч составляет в среднем 10-13 %.

**Выводы**

1. Использование в качестве последующей термической обработки нормализации позволяет снизить величину удельного электрического сопротивления горячекатаной Ст3пс, подвергнутой ДТЦО, не менее чем на 10 %.

2. Совмещение ДТЦО с последующей нормализацией при 700 °С в течение 1 ч для горячекатаной стали Ст3пс снижает удельное электрическое сопротивление в среднем на 12 % по сравнению с промышленной технологией.

## Список литературы

1. *Федюкин В.К.* Термоциклическая обработка металлов и деталей машин/ В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский – Л. :Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989.– 255 с.

2. *Прудников А.Н.* Технология производства, структура и свойства поршней двигателей из заэвтектического деформируемого силумина // Изв. ВУЗов. Черная металлургия.– 2009.– № 5.– 45-48.

3. *Метс Ю.А.* Низкотемпературная деформационно-термоциклическая обработка / Ю.А. Метс, М.Е. Смагоринский // Порошковые, композиционные и текстурованные материалы: Труды ЛПИ.– Л., 1986.– № 417.– С. 52-60.

4. *Прудников А.Н.* Комплексное воздействие отжигов и термоциклической ковки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // Деформация и разрушение материалов.– 2014.– № 2.–С.14 - 20.

5. *Дьяченко С.С.* Особенности влияния холодной деформации и ТЦО на структуру и свойства низкоуглеродистых сталей / С.С. Дьяченко, Е.А. Кузьменко, А.И. Поляничка // Термоциклическая обработка металлических изделий. – Л. Изд-во ЛПИ, 1982.– С. 18-19.

6. *Прудников А.Н.* Поршневые деформируемые заэвтектические силумины // Технология металлов.– 2014.– № 2.– С. 8 - 11.

7. *Лахтин Ю.М.* Металловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин.– М.: Металлургия, 1993.– с. 448.

8. *Афанасьев В.К.* Влияние термоциклической деформации и отжига на структуру и удельное сопротивление стали марки Ст3пс / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников, М.В. Попова, В.А. Прудников// Актуальные проблемы в машиностроении: Сб. материалов 1 Международной научно-практич. конф.– Новосибирск: изд-во НГТУ, 2014.– С. 431-434.

9. *Прудников А.Н.* Оценка воздействия термоциклической деформации и последующей термической обработки на электрофизические свойства низкоуглеродистой стали / А.Н. Прудников, М.В. Попова, В.А. Прудников// Актуальные проблемы в машиностроении: Сб. материалов 11 Международной научно-практич. конф.– Новосибирск: изд-во НГТУ, 2014.– С. 396-400

# INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF LOW CARBON STEEL, MANUFACTURED USING DTCT

**Prudnikov A. N.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: a.prudnikov@mail.ru
**Popova M. V.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru
**Prudnikov V. A.**, Ph.D. student, e-mail: vladpr88@gmail.com

Siberian State Industrial University, 42 Kirova st. Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

**Abstract:** The results of the effect of heat treatment: normalization and tempering on the electrical resistivity of the hot-rolled carbon steel sheet Ст3пс produced using thermal cycling mode of deformation processing (DTCT). DTCT preliminary thermocycling was rolled (5 cycles at a reduction of 10-15 % in each cycle, and cooled to a temperature below the $A_{r1}$). And normalizing annealing was carried out in the range from 100 to 900 °C increments to 100 °C for 1 hour. The possibility to reduce the magnitude of the specific electrical resistance of the hot-rolled steel manufactured using DTCT mode through the use of subsequent normalizing at 700 °C on average 10 %, and by annealing – no more than 5 %. A further increase in the time of normalization at 700 °C to 3, 5 and 10 hours has no significant effect on the value of the electrical resistance of the steel subjected DTCT. However, the downward trend in resistivity is maintained. Overall reduction of electrical resistivity of the hot-rolled steel Ст3пс by using mode DTCT and subsequent normalizing at 700 °C for 1 hour is more than 12 %.

**Keywords**: steel, structure, thermocyclic rolling, annealing, normalizing, electrical resistivity.

**УДК 621.9.047**

# РОЛЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНТЕНСИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО РАСТВОРЕНИЯ СТАЛИ 12Х18Н9Т

*Х. М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор,*
*Б. А. КРАСИЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, профессор,*
*Н. П. ГААР, канд. техн. наук, доцент,*
*А. А. ЛОКТИОНОВ, ст. преподаватель,*
*С. И. ВАСИЛЕВСКАЯ, аспирант*
*(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Гаар Н.П. – 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: lianelas@mail.ru

**Аннотация:** В статье рассмотрены вопросы активации анодного растворения нержавеющей стали 12Х18Н9Т лазерным излучением. Рассмотрены основные причины торможения процесса анодного растворения и возможные пути их устранения. Экспериментально показано, что механическое обновление анодной поверхности снимает ограничения, связанные с образованием труднорастворимых оксидных пленок на обрабатываемой поверхности. Механическая активация приводит к росту плотности анодного тока до 10 раз, что свидетельствует об интенсификации процесса анодного растворения. При введении лазерного излучения в зону обработки рост плотности тока составляет до 100 крат. Данный факт объясняется не только снятием ограничений в процессе анодного растворения, связанных с образованием оксидных пленок, но и с повышением реакционной способности электролита при поглощении лазерного излучения.

**Ключевые слова:** активация, анодное растворение, лазерное излучение, интенсификация, плотность тока, плотность мощности, реакционная способность, электролит.

**Введение**

Совершенствование существующих методов обработки материалов с целью повышения их производительности, точности и качества зачастую осуществляется за счет комбинирования различных процессов в одной обработке. Так в работе [1] разработаны теоретические основы комбинирования термических и деформационных процессов в поверхностной обработке. Исследованию высокоэнергетических процессов различной физической природы с целью их комбинирования посвящена монография [2].

Электрохимическая размерная обработка материалов, являясь более совершенной по сравнению с традиционными технологиями механической обработки и получившая широкое распространение в последние десятилетия, тем не менее имеет существенные ограничения при обработке труднообрабатываемых материалов, в микрообработке и т.д. В связи с этим дальнейшее развитие электрохимической размерной обработки возможно при введении в процесс дополнительных воздействий, направленных на устранение, либо снижение имеющихся место ограничений. Возможные пути интенсификации электрохимической обработки предложены авторами работ [3-5], которые предполагают решение задачи за счет теплового, механического, лазерного и др. механизмов активации.

Значительного эффекта в электрохимической обработке различного класса материалов удалось достичь при использовании элетроалмазного шлифования, реализующего механическое обновление обрабатываемой поверхности. Так для традиционно труднообрабатываемых материалов – твердых сплавов использование электроалмазной обработки позволило достичь высоких показателей точности и качества при значительном повышении производительности [6-8]. Развитие электроалмазного шлифования как технологического метода привело к расширению области его использования, например, для обработки инструментальных сталей [9-12] и деталей с покрытиями [13-15].

Разработка и создание нового класса материалов – аморфных и нанокристаллических поставило перед технологами задачу поиска решений в обработке изделий, выполненных из них. Результаты авторов [16-19] свидетельствуют о перспективе использования электроалмазного шлифования для решения данной задачи.

Следующим шагом в развитии технологии электрохимической размерной обработки является использование для активации процесса ла-

зерного излучения. При разработке нового метода лазерно-электрохимической обработки [20] предполагалось, что интенсификация процесса возможна как за счет повышения реакционной способности электролита, так и создания светогидравлического эффекта, воздействующего на образующиеся в процессе электрохимической реакции поверхностных оксидных пленок [3].

Предварительные исследования по лазерно-электрохимической обработке стали 12Х18Н9Т выполнены в работах [21,22]. Эффективному электрохимическому растворению компонентов нержавеющей стали мешает образование на поверхности оксидных пленок [23].

В связи с этим возникает вопрос об эффективности удаления пассивирующих пленок лазерным излучением по сравнению с механическим обновлением поверхности, характерным для электроалмазного шлифования.

**Методика экспериментального исследования**

Для оценки эффективности различных механизмов активации размерной электрохимической обработки были проведены экспериментальные исследования анодного растворения в стационарных условиях (без использования активации), анодного растворения с механическим обновлением поверхности и анодного растворения при активации процесса лазерным излучением. Для соблюдения идентичности условий эксперимента исследование вышеотмеченных процессов проводилось при использовании одной и той же электрохимической ячейки, конструкция которой описана в работе [24]. Исследование анодного поведения материала в условиях лазерной активации проводилось на установке [25], дальнейшее совершенствование которой для лазерно-электрохимической обработки с использованием комбинации спектров излучения представлено в работе [26].

В настоящей работе при исследовании анодного поведения обрабатываемого материала в условиях лазерной активации использовалось излучение длиной волны 1,06 мкм, плотностью мощности $1{,}05 \cdot 10^6$ Вт/м$^2$ и частотой следования импульсов 2,5 кГц. Значение плотности мощности было выбрано согласно рекомендациям работы [27], а частота следования импульсов – по данным работы [28], в которой определено оптимальное значение данного параметра по критерию достигаемой плотности тока для исследуемых в настоящей работе условий электрохимической обработки (длина волны излучения, состав электролита, марка обрабатываемого материала).

Изучение анодного растворения осуществлялось при использовании потенциодинамического метода с заданием развертки потенциала и регистрацией установившегося значения тока при помощи потенциостата-гальваностата модели IP-Pro-M.

Механическая активация электрохимического растворения осуществлялась обновлением обрабатываемой поверхности с помощью наждачной бумаги перед каждым экспериментом. В этом случае регистрация плотности тока при разных значениях потенциала производилась потенциостатическим методом (регистрация токов включения). После проведения серии экспериментов полученные результаты представлялись зависимостью в координатах «плотность тока - потенциал», что позволило провести сравнительный анализ с данными потенциодинамического метода, полученного в условиях непрерывной развертки потенциала.

Выбор в качестве электролита 10% водного раствора хлорида натрия для обработки стали 12Х18Н9Т обоснован рекомендациями работы [22].

**Результаты и обсуждение**

На рис. 1 представлены поляризационные зависимости, полученные для стационарных условий электрохимического растворения нержавеющей стали 12Х18Н9Т потенциодинамическим методом (кривая 1) и в условиях механического обновления обрабатываемой поверхности, построенная по токам включения полученных с помощью потенциостатического метода (кривая 2).

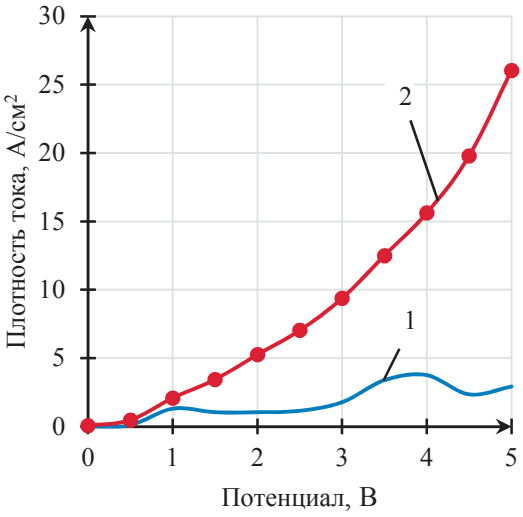



Рисунок 1 – Поляризационные кривые анодного растворения нержавеющей стали 12Х18Н9Т в 10% водном растворе NaCl:
1 - в стационарных условиях; 2 - при механическом обновлении анодной поверхности

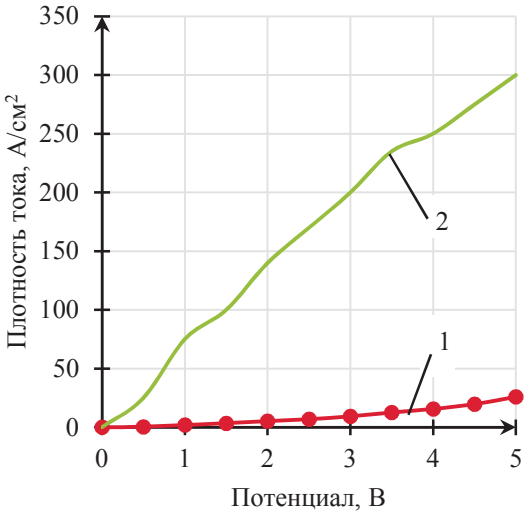



Рисунок 2 – Поляризационные кривые анодного растворения нержавеющей стали 12Х18Н9Т в 10% водном растворе NaCl:
1 - при механическом обновлении анодной поверхности, 2 - в условиях лазерной интенсификации процесса

Если для кривой 1 характерны наличие участков активного растворения (в области потенциалов от 0 до 4 В), далее следует участок пассивации (4,0 – 4,5 В), при дальнейшем увеличении потенциала имеет место область транспассивного растворения обрабатываемого материала, то на кривой 2, соответствующей электрохимическому растворению в условиях механического обновления поверхности анода, наблюдается непрерывный рост плотности тока с увеличением потенциала. Наличие участка пассивации для условий стационарного электрохимического растворения связано с образованием оксидных пленок химических элементов обрабатываемого материала и объясняет низкое значение (2,9 А/см$^2$) максимальной плотности тока. Образование оксидных пленок и является ограничивающим фактором в электрохимическом растворении нержавеющей стали 12Х18Н9Т в 10% водном растворе NaCl. Действие данного механизма снижения активности элерохимического процесса в этих условиях было обосновано в работе [29]. Устранение отмеченных ограничений за счет механического обновления анодной поверхности позволило достичь плотности тока до 26 А/см$^2$ в исследованном диапазоне потенциалов.

Введение лазерного излучения в зону электрохимического растворения обеспечило рост плотности тока до 300 А/см$^2$ (кривая 2, рис. 2), что существенно выше результата электрохимического растворения в условиях обновления анодной поверхности (кривая 1, рис. 2).

Очевидно, что при лазерной активации процесса анодного растворения имеет место не только механизм снятия ограничений, связанных с образованием оксидных пленок. Значительный рост плотности тока (до 10 раз по сравнению с механическим обновлением обрабатываемой поверхности и до 100 раз по сравнению с анодным растворением в стационарных условиях) связан с проявлением иного механизма активации при использовании лазерного излучения. Таким механизмом может быть увеличение реакционной способности электролита при лазерной активации. Известно, что степень роста плотности тока при электрохимическом растворении является мерой увеличения скорости процесса обработки. Данный факт свидетельствует о вкладе того или иного способа активации электрохимического растворения в повышение его эффективности.

**Выводы**

1. Теоретически предположено о существовании ограничений в процессе электрохимического растворения в стационарных условиях нержавеющей стали 12Х18Н9Т в водном растворе хлорида натрия, связанных с образованием оксидных пленок. Предложен механизм снятия этих ограничений с помощью механического обновления анодной поверхности. Экспериментально подтверждено, что данный механизм активации процесса анодного растворения нержавеющей стали 12Х18Н9Т в 10% водном растворе NACl позволит повысить плотность тока с 2,9 А/см$^2$ до 26 А/см$^2$ в исследуемом диапазоне потенциалов.

2. Введение лазерного излучения в зону электрохимического растворения нержавеющей стали позволило значительно увеличить интенсивность анодного растворения, увеличив плотность тока до 300 А/см$^2$. Достижение такой ско-

рости электрохимического процесса невозможно только за счет снятия ограничений, связанных с образованием оксидных пленок. Введение лазерного излучения, очевидно, помимо устранения данного ограничения, повлияло и на поведение других элементов электрохимической системы, в частности, на используемый в обработке электролит. Поглощение лазерного излучения ионами NaCl повысило их реакционную активность, обеспечивая значительное повышение скорости электрохимической реакции по анодному растворению стали 12Х18Н9Т.

## Список литературы

1. *Рахимянов Х.М.* Теоретические основы комбинирования высокоинтенсивных термических и деформационных процессов в поверхностной обработке. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Тула. 1998. -40с.

2. *Солоненко О.П.* Высокоэнергетические процессы обработки материалов / О.П. Солоненко, В.В. Марусин, Х.М. Рахимянов [и др.]; ред.: М.Ф. Жуков, В.М. Фомин; Сиб. отд-ние Рос. акад. наук, Ин-т теорет. и прикладной механики. – Новосибирск: Наука, 2000. – 425 с.: ил., табл. – (Низкотемпературная плазма. Т. 18)

3. *Гаар Н.П., Рахимянов Х.М.* Пути интенсификации электрохимической размерной обработки // Ползуновский альманах. – 2008. - № 4. – С. 191 – 192.

4. *Rakhimyanov H.M, Gaar N.P.*, Possible ways for intensification of dimensional electrochemical machining (DECM) // IFOST. Novosibirsk- Tomsk, Russia, June 23-29, 2008 - Proceedings of the third international forum on strategic technologies.- Novosibirsk, NSTU-2008- P. 106-107.

5. *Рахимянов Х.М.*, Рахимянов К.Х., Гаар Н.П. Оценка механизмов активации процесса электрохимической размерной обработке нержавеющей стали // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3. – С. 19–21.

6. *Рахимянов Х.М.*, *Красильников Б.А., Янпольский В.В., Красильников Д.Б.* Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3. – С. 3–7.

7. *Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимянов К.Х., Никитенко М.И.* Электроалмазное шлифование твердого сплава ВК8 // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3. – С. 9–13.

8. *Рахимянов Х.М.*, *Красильников Б.А., Никитенко М.И., Богаев А.А*. Исследование производительности электроалмазной обработки жаропрочного сплава ЖС6 и твердого сплава ВК8 // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2007. – № 3. – С. 8–10.

9. *Рахимянов Х.М.*, *Красильников Б.А., Янпольский В.В.* Влияние диффузионных ограничений на процесс анодного растворения стали Р6М5 при электроалмазном шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 2. – С. 31–32.

10. *Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В.* Повышение производительности процесса электроалмазного шлифования быстрорежущих сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 4. – С. 7–8.

11. *Рахимянов Х.М.*, *Красильников Б.А., Янпольский В.В.* Определение режимов обработки быстрорежущей стали Р6М5 при глубинном электроалмазном шлифовании // Сварка в Сибири. – 2005. – № 1. – С. 49–50.

12. *Рахимянов Х.М.*, *Янпольский В.В.* Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2003. - № 4. – С. 141–147.

13. *Рахимянов Х.М.*, *Красильников Б.А., Янпольский В.В., Никитенко М.И., Моисеенко А.Н.* Электрохимическое растворение покрытий из порошковых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 2. – С. 3–5.

14. *Рахимянов Х.М.*, *Янпольский В.В., Моисеенко А.Н.* Размерная обработка деталей с покрытиями из наноструктурированных порошковых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 4. – С. 22–26.

15. *Рахимянов Х.М.*, *Янпольский В.В., Моисеенко А.Н.* Электроалмазная обработка напыленных износостойких покрытий // Инженерия поверхностного слоя деталей машин. Труды Международной научно-практической конференции. г. Кемерово, - 2009. – С. 365-368.

16. *Рахимянов Х.М.*, *Красильников Б.А., Рахимянов К.Х., Еремина А.С.* Модернизация оборудования для электроалмазного шлифования изделий из аморфных и нанокристаллических сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3. – С. 37–39.

17. *Рахимянов Х.М., Рахимянов К.Х.* Влияние режимов обработки на производительность электроалмазного шлифования нанокристаллических и аморфных сплавов // Научный вестник НГТУ. – 2010. - № 1. – С. 99–110.

18. *Рахимянов Х.М.*, *Рахимянов К.Х., Гаар Н.П.* Активация анодного растворения аморф-

ных и нанокристаллических сплавов непрерывным обновлением поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 1. – С. 35–38.

19. *Рахимянов Х.М.*, *Красильников Б.А., Рахимянов К.Х.* Точность формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристаллических сплавах // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 2. – С. 32–33.

20. Пат. 2451582 Российская Федерация, МПК 54 B23H5/00, B23K28/02, B23H3/00, B23K26/00 Способ размерной обработки металлов и сплавов [Текст]/ Х.М. Рахимянов, А.И. Журавлев, Н.П. Гаар, А.А. Локтионов; заявитель и патентообладатель: Новосиб. гос. техн. ун-т. – № 2010128204/02; заявл. 07.07.2010; опубл. 27.05.2012 Бюл № 15 – 11 с. : ил.

21. Повышение реакционной способности электролита NaNO3 лазерным излучением при электрохимической обработке / Н. П. Гаар, А. И. Журавлев, А. А. Локтионов // Электротехника. Энергетика. Машиностроение (ЭЭМ–2014) = Electrical engineering. energy mechanical engineering (EEM–2014) : сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 2–6 дек. 2014 г. В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 3. Секция «Машиностроение». – С. 40-43.

22. *Рахимянов Х.М.*, *Красильников Б.А., Гаар Н.П.* Анодное поведение стали 12Х18Н9Т в водном растворе хлорида натрия при активации процесса электрохимического растворения лазерным излучением // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2010. - № 2. – С. 123–128.

23. *Рахимянов Х.М.*, *Гаар Н.П.* Анодное поведение компонентов нержавеющей стали в условиях лазерной интенсификации // Инновации в машиностроении. Сборник трудов 2-ой Международной научно-практической конференции. г. Кемерово. - 2011. - С. 157-160.

24. *Гаар Н.П.*, *Рахимянов Х.М.* Электрохимическая ячейка для исследования интенсификации ЭХРО лазерным излучением // Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса. Труды первой всероссийской научно-технической конференции, конф., Кемерово., 24-25 октября 2007 г. Кемерово. - 2007. - С. 251-254.

25. *Рахимянов Х.М.*, *Журавлев А.И., Гаар Н.П.* Установка для исследования электрохимических процессов в условиях лазерной активации процесса электрохимической размерной обработки // Научный вестник НГТУ. – 2010. - № 2. – С. 135–144.

26. *Рахимянов Х.М.*, *Красильников Б.А., Гаар Н.П., Журавлев А.И., Локтионов А.А.* Установка для исследования материалов в условиях лазерно-электрохимической обработки комбинированным излучением // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3. – С. 30–32.

27. *Гаар Н.П.*, *Рахимянов Х.М.* Математическое моделирование при лазерной термоактивации электрохимической размерной обработке // Современные технологические системы в машиностроении (СТСМ-2006). Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции. конф., Барнаул, 2006 г. Барнаул. - 2006. - С.45-47.

28. *Gaar N. P.*, Rakhimyanov K.M. Intensification of anodic dissolution of conductive materials by laser radiation // Interfinish-Seria 2014 : book abstr., intern. conf. on surface engineering for research and industrial applications, Novosibirsk, 30 June – 4 July 2014. – Novosibirsk : NSTU Publ., 2014. – P. 58.

29. *Gaar N.*, *Zhuravlev A., Loktionov A.* Increase of NaNO3 electrolyte reaction capability by laser irradiation for electrochemical machining // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 698 P. 312-315.

## LASER EFFECT ON AN INTENSIFICATION OF ELECTROCHEMICAL DISSOLUTION OF STEEL 12H18N9T

**Rakhimyanov Kh.M.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru
**Krasilnikov B.A.**, C.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: _167bak@ngs.ru
**Gaar N.P.**, C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: lianelas@mail.ru
**Loktionov A.A.**, lecturer, e-mail: pushkin-lok@mail.ru
**Vasilevskaya S.I.**, PhD student, e-mail: svetlana.vasilevskaya.87@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

**Abstract:** The paper describes problems of the activation of anodic dissolution of stainless steel 12H18N9T by laser radiation. The main inhibition factors of the anodic dissolution process and possible ways of their elimination. It was shown experimentally that the mechanical update anode surface removes restrictions associated with the formation of sparingly soluble oxide films on the treated surface. Mechanical activation leads to an increase in anodic current density up to 10 times, which indicates the intensification of the process of anod-

ic dissolution. With the introduction of laser radiation into the treatment zone the increase in the current density gains up to 100 times. This fact is due not only to remove the restrictions on the anodic dissolution process associated with the formation of oxide films, but also to increase the reactivity of the electrolyte in the absorption of laser radiation.

**Keywords:** Activation, anodic dissolution, laser radiation, intensification, current density, power density, reactivity, electrolyte.

**УДК 621.9.047**

# ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ РАСТВОРЕНИЕ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р12Ф3К10М2

*Х. М. РАХИМЯНОВ, докт. техн. наук, профессор*
*В. В. ЯНПОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук, доцент*
*М. В. ИВАНОВА, магистрант*

630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет
e-mail: kharis51@mail.ru, yanpolskiyv@mail.ru, ivanova777888@yandex.ru

**Аннотация:** Проведены экспериментальные исследования электрохимического растворения быстрорежущей стали Р12Ф3К10М2 в водных растворах нейтральных солей $NaNO_3$, $Na_2SO_4$ и NaCl. Установлено, что электрохимическое растворение быстрорежущей стали Р12Ф3К10М2 в водных растворах нейтральных солей $Na_2SO_4$ и NaCl происходит в активном состоянии в диапазоне потенциалов от 1 до 8 В. Электрохимическое растворение стали Р12Ф3К10М2 в водном растворе 10% $NaNO_3$ сопровождается участком торможения в диапазоне потенциалов $\varphi$ = 6…6,5 В, связанным с образованием на поверхности анода окисной пленки. Наибольшее значение плотности тока i = 32 А/см$^2$ было достигнуто при растворении быстрорежущей стали Р12Ф3К10М2 в водном растворе 10% NaCl. Наименьшее значение плотности тока были зафиксированы при растворении исследуемой стали в сульфатном растворе.

**Ключевые слова:** электрохимическое растворение, быстрорежущие стали, пассивация, поляризационные исследования, электролиты

**Введение**

Применение электрохимической размерной обработки при формообразовании деталей различной конфигурации из высокопрочных сталей и сплавов получило широкое распространение в практике машиностроительных заводов благодаря отсутствию механического воздействия на обрабатываемый материал [1]. Этот факт позволяет достигать высокого качества поверхностного слоя при достаточно высокой производительности процесса. В условиях электрохимического растворения на производительность и качество обработки влияние оказывает большое количество факторов, основными из которых являются режимы формообразования, анионный и катионный состав электролита. Кроме того одним из важных факторов, влияющих на производительность и качество электрохимического формообразования является химический состав обрабатываемого материала. Связано это с тем, что компоненты, входящие в состав обрабатываемого материала, существенно различаются по характеру анодного растворения при электрохимической обработке, что в итоге определяет качество обработанной поверхности и производительность процесса формообразования. Следует отметить, что высокопрочные стали и сплавы, к которым относится и быстрорежущая сталь Р12Ф3К10М2, представляют собой композицию различных по свойствам химических элементов. В связи с этим для эффективного применения электрохимической обработки необходимо определить особенности электрохимического растворения обрабатываемого материала в выбранном составе электролита.

**Методика проведения экспериментов**

В качестве исследуемого материала была выбрана многокомпонентная, быстрорежущая сталь Р12Ф3К10М2 ТУ14-1-1686-76 с содержанием 12% карбида вольфрама, 3% ванадия, 10% кобальта, 2% молибдена [2].

Выявление особенностей анодного поведения металлов и сплавов в электролитах различного состава возможно при изучении анодных поляризационных характеристик, устанавливающих зависимость скорости электрохимического растворения, которая характеризуется зависимостью величины плотности тока от потенциала анода. Исследование электрохимического растворения быстрорежущей стали Р12Ф3К10М2 проводились на потенциостате П5827М. Потенциал анода изменялся от 0 до 8 В. Площадь поперечного сечения образца составляла S = 0,011 см$^2$. Эксперименты проводились в трехэлектродной электрохимической ячейке (рис. 1).

Зазором между исследуемым образцом (рабочим электродом-анодом) и электродом сравнения составлял 0,1 мм. При подготовке рабочего электрода его боковые поверхности изолировались эпоксидной смолой в специальной оправке из эбонита так, чтобы растворение происходило только торцевой поверхности (рис. 2). Вспомогательный электрод изготавливался из медной пластины толщиной 3 мм.

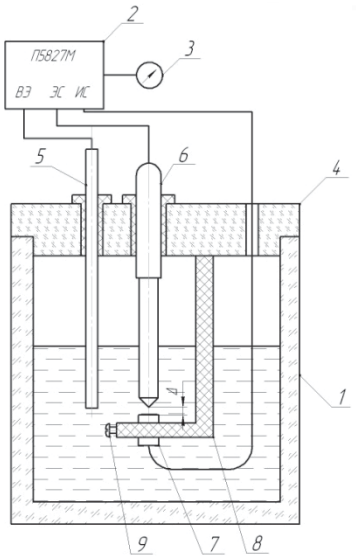



Рисунок 1 – Схема трехэлектродной электрохимической ячейки
1 – емкость для электролита; 2 - потенциостат П5827М; 3 – микроамперметр; 4 – крышка; 5 – вспомогательный электрод; 6 – электрод сравнения; 7 – исследуемый образец; 8 – кронштейн; 9 - крепежный винт;

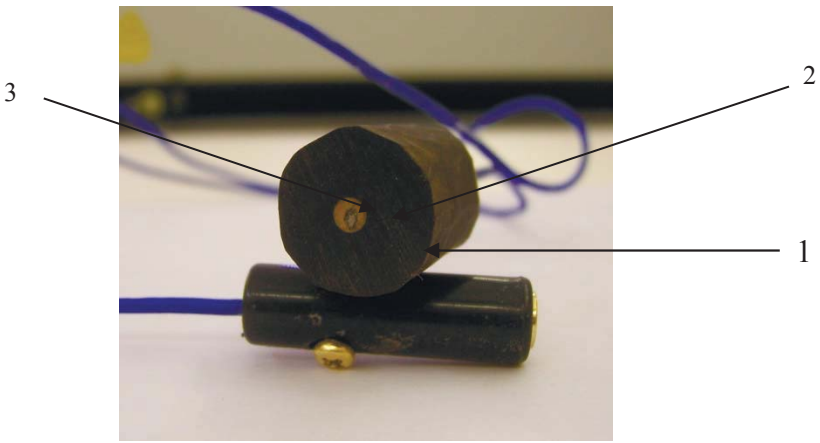



Рисунок 2 – Внешний вид образца для потенциодинамических исследований
1 - оправка из эбонита; 2 - исследуемый образец из стали Р12Ф3К10М2; 3 - эпоксидная смола.

Перед погружением в электрохимическую ячейку торцевая поверхность образца зачищалась наждачной бумагой.

В качестве электролитов были использованы 10 % растворы нейтральных солей $NaNO_3$, $Na_2SO_4$ и NaCl в воде. Электролиты готовили из солей марки «ч.д.а.» и «х.ч.».

**Результаты и обсуждение результатов исследований**

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены поляризационные характеристики электрохимического растворения быстрорежущей стали Р12Ф3К10М2 в водных растворах нейтральных солей $NaNO_3$, $Na_2SO_4$ и NaCl (рис. 3). Из рисунка видно, что растворение исследуемой стали в водном растворе 10 % $Na_2SO_4$ (рис. 3, кривая 1) происходит в активном состоянии в диапазоне потенциалов от 1 до 8 В., о чем свидетельствует непрерывное увеличение плотности тока с повышением потенциала анода. Вероятно, анион $SO_4^-$ препятствует образованию окисной пленки на поверхности стали, вытесняя кислород. Однако следует отметить, что плотность тока при растворении стали в сульфатном электролите ниже, чем при растворении в нитратном растворе (рис. 3, кривая 2). Это объясняется тем, что электропроводность сульфатного раствора в 2…2.2 раза ниже в сравнении с нитратным электролитом.

При этом растворение стали Р12Ф3К10М2 в водном растворе 10% $NaNO_3$ (рис. 3, кривая 2) происходит с незначительным участком торможения процесса в области потенциалов $\varphi$ = 6…6,5 В. Вероятно, это связано с образованием на поверхности анода окисной пленки [1, 3, 4]. Увеличение потенциала анода свыше $\varphi$ = 6,5 В приводит к дальнейшему росту плотности тока, что может свидетельствовать об активном растворении исследуемой.

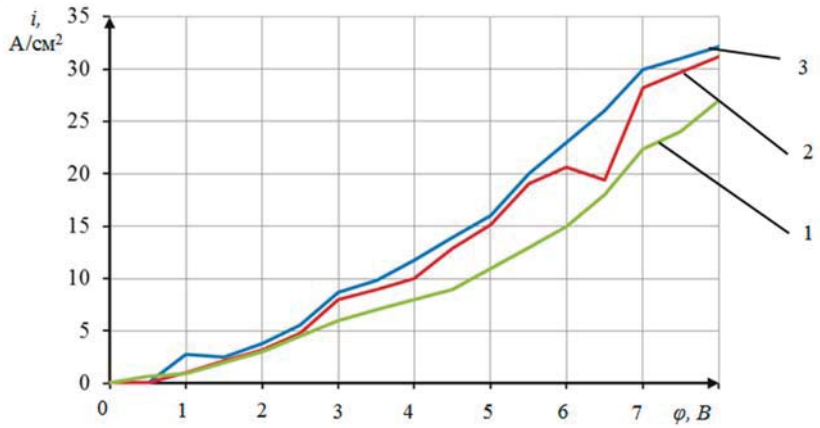



Рисунок 3 – Поляризационные кривые электрохимического растворения быстрорежущей стали Р12Ф3К10М2 в водных растворах нейтральных солей:
1 - 10% $Na_2SO_4$, 2 - 10% $NaNO_3$, 3 - 10 % NaCl

Электрохимическое растворение исследуемой стали в водном растворе 10% NaCl (рис. 3, кривая 3) происходит в активном состоянии во всем исследуемом диапазоне потенциалов, о чем свидетельствует рост плотности тока с увеличением потенциала анода.

**Выводы**

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что электрохимическое растворение быстрорежущей стали Р12Ф3К10М2 в водных растворах нейтральных солей $Na_2SO_4$ и NaCl происходит в активном состоянии в диапазоне потенциалов от 1 до 8 В. Однако величина плотности тока при растворении исследуемой стали в сульфатном растворе ниже, чем при растворении в нитратном и хлоридном. Электрохимическое растворение стали Р12Ф3К10М2 в водном растворе 10% $NaNO_3$ сопровождается участком торможения в диапазоне потенциалов $\varphi$ = 6…6,5 В, связанным с образованием на поверхности анода окисной пленки. Наибольшее значение плотности тока i = 32 А/см$^2$ было достигнуто при растворении быстрорежущей стали Р12Ф3К10М2 в водном растворе 10% NaCl.

## Список литературы

1. *Щербак М.В.* Основы теории и практики электрохимической обработки металлов и сплавов/М.В. Щербак, М.А. Толстая, А.П. Анисимов, В.Х. Постаногов// – М.: Машиностроение. - 1981. – 263 с.

2. *Геллер Ю.А.* Инструментальные стали. - М.: Металлургия, 4-е изд., 1975. - 584 с.

3. *Рахимянов Х.М.* Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах / Х.М. Рахимянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский//Сб. науч. тр. НГТУ – 2003 – №4 (34). - Новосибирск. 2003 г. - С. 141 – 146.

4. *Рахимянов Х. М.* Исследование электролитов, обеспечивающих точность электрохимической обработки меди М1 / Х. М. Рахимянов, Б. А. Красильников, С. И. Василевская // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы 6 междунар. науч.-техн. конф., Барнаул, 23–26 сент. 2014 г. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. - Ч. 2. – С.100-104.

# ELECTOCHEMICAL DISSOLUTION SPEED STEEL R12F3K10M2

**Rakhimyanov Kh. M**. , D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru
**Yanpolskiy V. V.** , C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: yanposk-yv@mail.ru
**Ivanova M. V.** M.Sc. (Engineering), e-mail: ivanova777888@yandex.ru

Novosibirsk state technical university, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

**Abstract:** Pilot studies of electrochemical dissolution of R12F3K10M2 quick cutting steel in water solutions of neutral $NaNO_3$, $Na_2SO_4$ and NaCl salts were conducted. It is established that electrochemical dissolution of R12F3K10M2 quick cutting steel in water solutions of neutral $Na_2SO_4$ and NaCl salts happens in an active state in the range of potentials from 1 to 8 V. Electrochemical dissolution of R12F3K10M2 steel in water solution of 10% $NaNO_3$ is followed by a braking plot in the range of potentials $\varphi = 6 \ldots 6{,}5$ V, connected with education on a surface of the anode of an oxide film. The greatest value of density of current of i= 32 A/cm$^2$ was reached on dissolution of R12F3K10M2 quick cutting steel in water solution of 10% of NaCl. The smallest value of density of current wasrecorded at dissolution of the studied steel in sulphatic solution.

**Keywords:** electrochemical dissolution, quick cutting steels, passivation, polarizing researches, electrolytes

**УДК 621.9.047**

# МИКРОТВЕРДОСТЬ И ПОРИСТОСТЬ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЗЕРКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГИЛЬЗ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

*Х. М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор,*
*В. В. ЯНПОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук, доцент,*
*Р. М. КАДЫРБАЕВ, магистрант*
*(НГТУ, г. Новосибирск)*

Рахимянов Х.М. - 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: kharis51@mail.ru

**Аннотация:** Потеря работоспособности гидроцилиндров, как правило, связана с появлением дефектов на рабочей поверхности гильз и поршней, таких как царапины, сколы и задиры. В данной статье рассмотрены методы восстановления зеркальной поверхности гильз гидроцилиндров и показано, что восстановление дефектов, приводящих к нарушению герметичности при эксплуатации, возможно гальваническим методом. В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что пористость никелевого покрытия, полученного гальваническим методом при плотности тока 9 А/дм$^2$ и температуре электролита 40° С, не превышает 1%. При плотности тока свыше 12 А/дм$^2$ наблюдается образование дендритной, губчатой структуры. Микротвердость покрытия превышает значения микротвердости подложки и достигает 280 HV.

**Ключевые слова:** гидроцилиндр, гильза, электролит, температура электролита, гальваническое покрытие, плотность тока, микротвердость, пористость, дендритные образования.

**Введение**

Гидроцилиндрами называют объемные гидродвигатели с возвратно-поступательным движением выходного звена, которые широко используются в качестве исполнительных механизмов в различных машинах [1]. Потеря работоспособности гидроцилиндров, как правило, связана с появлением дефектов на рабочей поверхности гильз и поршней, таких как царапины, сколы и задиры (рис.1). Вследствие повреждений зеркала гильз быстро изнашиваются уплотнительные элементы и появляются протечки рабочей жидкости [1, 2].

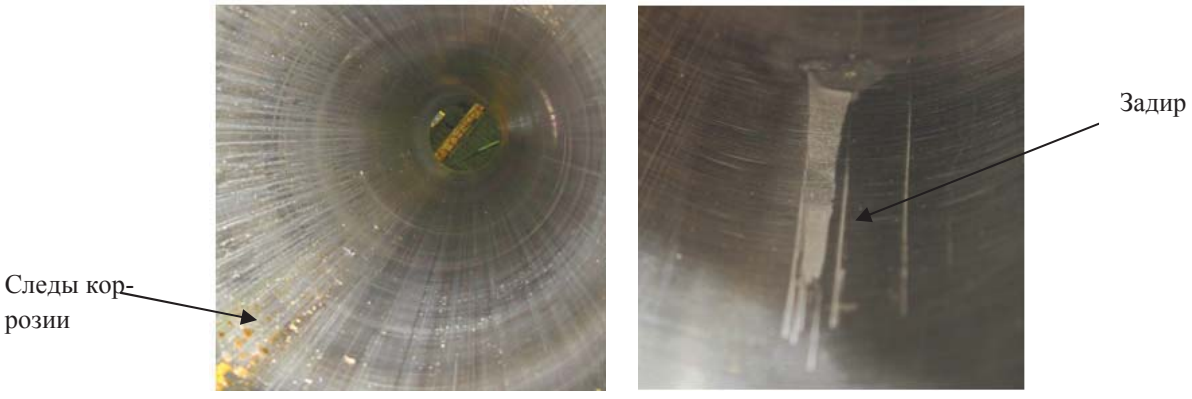



Рисунок 1 – Царапины и следы коррозии на поверхности гильзы гидроцилиндра

Поскольку гильзы гидроцилиндров являются металлоемкими, высокоточными и сложными в изготовлении изделиями, работоспособность таких деталей экономически и технологически рационально подвергать восстановлению. Основными способами восстановления подобного рода деталей являются механические и гальванические методы [3].

Механическое восстановление внутренних поверхностей изделий возможно при использо-

вании метода ремонтных размеров и метода установки дополнительной ремонтной детали (ДРД) [4].

Метод ремонтных размеров предусматривает восстановление формы и качества поверхности посредством растачивания и хонингования гильзы. При ремонте гильзы гидроцилиндра снимается минимальный слой металла до устранения задир и царапин, однако при реализация этого метода ремонта возникает необходимость в изготовлении соответствующего по размеру поршня.

Технологический процесс метода ДРД состоит в том, что внутреннюю цилиндрическую поверхность гильзы растачивают и устанавливают металлическую втулку, внутренний диаметр которой равен диаметру дефектной гильзы. В этом случае отпадает необходимость в новом поршне. Однако при небольшой толщине стенки дефектной гильзы этот метод не применим, а также экономически нецелесообразен в случаях наличия единичных дефектов небольшой глубины (до 100 мкм) на зеркальной поверхности гильзы [4, 5, 6].

Восстановление работоспособности зеркальной поверхности гильзы гидроцилиндра при наличие единичных дефектов возможно гальваническим способом [2] с последующей механической обработкой, включая процессы электроалмазного шлифования [3, 7, 8] и последующего ультразвукового пластического деформирования [9, 10, 11]. Применение данного метода позволяет локализовать процесс нанесения покрытия и восстанавливать поврежденный участок поверхности.

Одним из самых распространенных гальванических процессов является никелирование, которое обладает такими достоинствами, как прочное сцепление с поверхностью и несложная технология нанесения покрытия [12, 13]. Никелевое покрытие обладает высокой твёрдостью и износостойкостью, обеспечивая увеличение срока службы изделия.

Работоспособность зеркальной поверхности гильз гидроцилиндров во много будет зависеть от качества никелевого покрытия, в частности, от таких параметров как микротвердость и пористость.

**Методика экспериментального исследования**

Экспериментальные исследования по гальваническому осаждению никеля проводились на образцах размерами 25х25х5 мм, изготовленными из стали 45 ГОСТ 1050-88. Поверхности образцов, которые не подвергались восстановлению, изолировались клеем БФ-6 ГОСТ 12172.

На основаии анализа данных работы [13] был выбран состав электролита для гальванического осаждения покрытия, основными компонентами которого являются $NiSO_4$, NaCl, $MgSO_4$, $H_3BO_4$ в следующих концентрациях $NiSO_4$ -300 г/л, NaCl-10г/л, $MgSO_4$-60 г/л, $H_3BO_4$-15г/л, при этом кислотность электролита составила pH=5 [12].

Предварительная подготовка образцов включала в себя шлифование, полирование, электрохимическое обезжиривание, травление и декапирование.

Согласно рекомендациям работы [13] в качестве растворимого анода использовалась никелевая фольга, нанесенная на текстолитовую пластину.

Исследования по гальваническому осаждению никеля проводились на экспериментальной установке (рис. 2). Установка состоит из магнитной мешалки 1 модели 3М, оснащенной системой подогрева и регулирования скорости перемешивания электролита. На мешалку устанавливалась стеклянная цилиндрическая электрохимическая ячейка 3 диаметром 100 мм и высотой 150 мм. На специальных подвесках закреплялись катод 5 и анод 6. Расстояние между катодом и анодом составляло 30 мм. Подвески выполнены токопроводящими, при этом анод подключался к положительному полюсу источника тока, а катод к отрицательному. Контроль температуры электролита производился с помощью лабораторного термометра 9, установленного в электрохимической ячейке с электролитом.

Предварительные экспериментальные исследования показали, что режимные параметры, такие как температура электролита равная 40° С и плотность тока 9 $А/дм^2$, являются рациональными для гальванического осаждения никеля, с точки зрения достижения требуемой толщины покрытия [14].

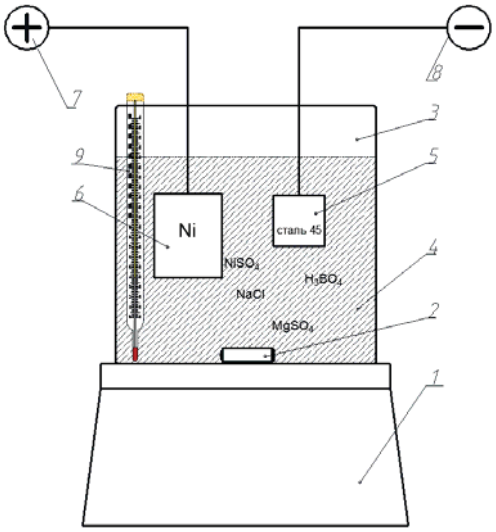



Рисунок 2 – Экспериментальная установка для гальванического осаждения никеля
1- магнитная мешалка с регулируемым подогревом модели 3М; 2- стальной штифт в изолированной оболочке для перемешивания электролита; 3 –электрохимическая ячейка; 4 – электролит; 5 – катод-сталь 45; 6 – анод-никель; 7 – положительный полюс источника тока; 8 – отрицательный полюс источника тока; 9 – термометр лабораторный

Как уже ранее отмечалось, качество покрытия характеризуется такими параметрами, как микротвердость и пористость, которые наряду с требуемой толщиной покрытия должны быть обеспечены при восстановлении работоспособности зеркальной поверхности гильзы гидроцилиндра.

Измерение пористости покрытия производилось металлографическим методом, при котором подсчитывалось количество пор на исследуемой площади микрошлифа.

Микротвердость покрытия измерялась на микротвердомере для проведения испытаний по Виккерсу модели 402MVD Walpert Group.

**Результаты экспериментов**

С помощью светового микроскопа Carl Zeiss AxioObserver A1m получен фотоснимок микрошлифа (рис. 3).

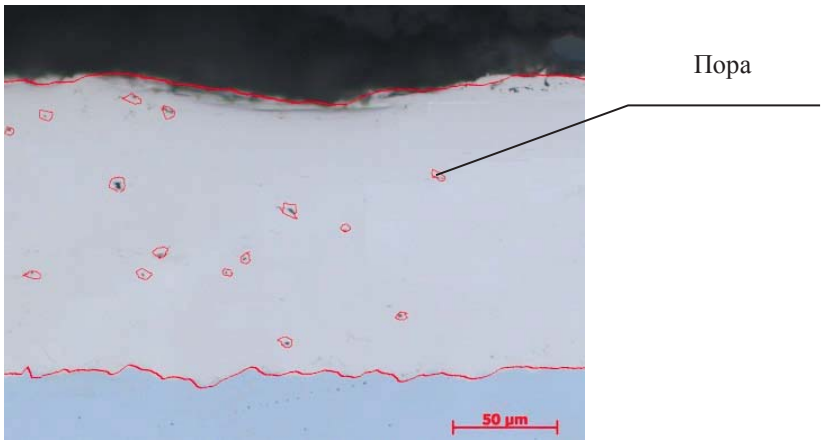



Рисунок 3 – Микрошлиф с порами

Используя графический редактор AutoCad 2015 посчитана общая площадь пор, которая составила 401 мкм$^2$, что составляет 1% от общей площади покрытия. Таким образом при температуре электролита 40° С и плотности тока 9 А/дм$^2$ наблюдается низкая пористость никелевого покрытия.

Последующее снижение пористости возможно за счет увеличения плотности тока $D_k$ [13], однако при достижении значений плотности тока 12 А/дм$^2$ наблюдается образование губчатой и дендритной структуры (рис. 4, 5).

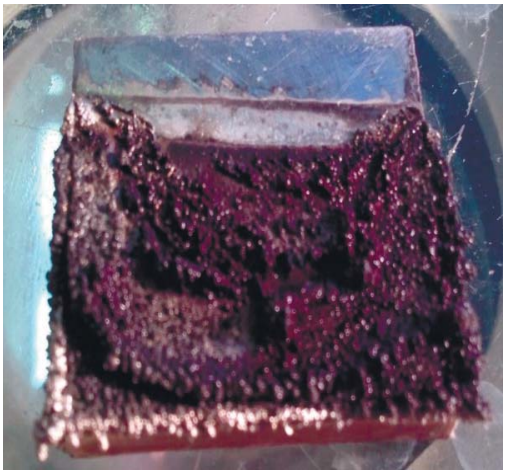


Рисунок 4 – Образец с покрытием, нанесенным при температуре электролита 80° С и плотности тока 12 А/дм$^2$

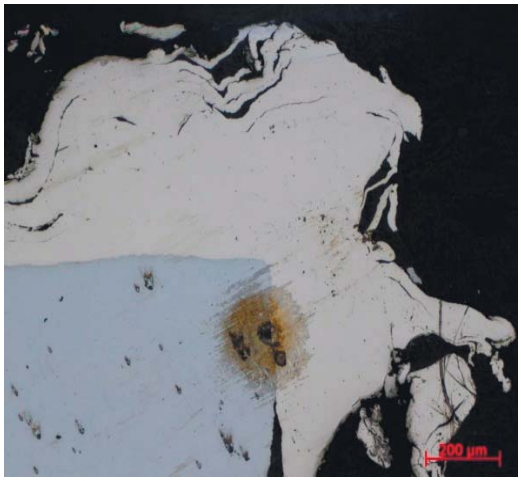



Рисунок 5 – Микрошлиф с покрытием, имеющим дендритообразную структуру

Такое формирование покрытия связано с тем, что при повышении плотности тока раствор у катода «беднеет» частицами осаждаемого металла, которые не успевают прибывать из других мест раствора к катоду. Концентрация частиц у катода настолько понижается, что усиливается выделение на катоде водорода [15, 16]. В связи с этим, образуется наслоение покрытия, снижающее прочность сцепления с подложкой (рис. 5).

Результаты измерения микротвердости покрытия и подложки представлены на рис. 6. Фотография уколов при измерении микротвердости покрытия и основы показана на рис. 7.

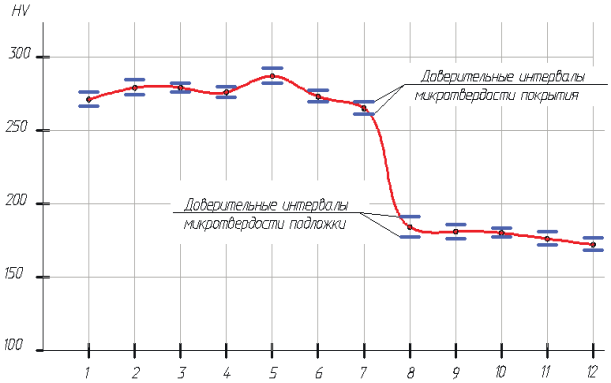



Рисунок 6 – График микротвердости покрытия и подложки

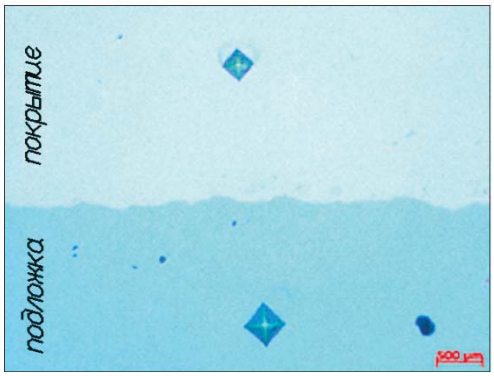



Рисунок 7 – Фотография уколов при измерении микротвердости покрытия и основы

Результаты экспериментальных исследований показали, что микротвердость никелевого покрытия превышает значение твердости подложки изготовленной из стали 45. Для окончательного формирования покрытия предлагается ввести операцию ультразвукового пластического деформирования, что обеспечит определенное повышение микротвердости, формирование сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое, а также образование регулярного микрорельефа на поверхности гильзы. Отмеченный комплекс свойств покрытия обеспечивает повышение эксплуатационных характеристик изделия, а, следовательно, увеличение его срок службы.

**Выводы**

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при плотности тока 9 А/дм$^2$ и температуре электролита 40° С наблюдается низкая пористость никелевого покрытия П=1%. Увеличение плотности тока до 12 А/дм$^2$ приводит к образованию губчатых и дендритных покрытий. Установлено, что микротвердость никелевого покрытия превышает значение твердости подложки и достигает значений 280HV.

## Список литературы

1. *Алексеева Т.В.* Гидропривод и гидроавтоматика землеройно-транспортных машин. — М.: Машиностроение. - 1966. –148с.

2. *Улашкин А.П.* Восстановление деталей и узлов автомобилей. - Хабаровск: Изд. ХГТУ. - 2002. - 204 с.

3. *Рахимянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н.* Размерная обработка деталей с покрытиями из наноструктурированных порошковых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. - №4. – С. 22-26.

4. *Шейпак А.А.* Гидравлика и гидропневмопривод. Ч. 2 Гидравлические машины и гидропневмопривод.- М:МГИУ. - 2009.-352 с.

5. *H. Judd.* The Hydraulic Equipment of the Ohio State University....-2012. – 22 p.

6. *Карагодин В.И., Митрохин Н.Н.* Ремонт автомобилей и двигателей.-2-е изд., стер.- Москва: Издательский центр «Академия». - 2003.- 496с.

7. *Рахимянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н.* Электроалмазная обработка напыленных износостойких покрытий// Инженерия поверхностного слоя деталей машин. – 2009. – С. 365-368.

8. *Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимянов К.Х.* Точность формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристаллических сплавах// Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. - №2. – С. 32-33.

9. *Рахимянов Х.М., Семенова Ю.С., Третьяков М.А.* Повышение качества поверхностного слоя деталей с покрытиями малой толщины из нанокристаллических порошков ультразвуковым пластическим деформированием // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. - №3. – С. 18-22.

10. *Рахимянов Х.М., Семенова Ю.С.* Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2010. – №2. – С. 3-10.

11. *Исупов А.В., Никитин Ю.В., Рахимянов Х.М.*, Прогнозирование состояния материала в очаге деформации при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – №4. – С. 41-46 .

12. *Беленький М.А., Иванов А.Ф.* Электроосаждение металлических покрытий: Справочник. - М.: Металлургия. - 1985.-292с.

13. *Ямпольский А.М.* Краткий справочник гальванотехника. –Л.:Машиностроение, Ленингр. отд-ние., 1981. -269с.

14. *Янпольский В.В., Кадырбаев Р.М.* Влияние температуры электролита на качество гальванического покрытия при восстановлении работоспособности зеркальной поверхности гильз гидроцилиндра // Актуальный проблемы в машиностроении.-2015. - №2. - С.181-186.

15. *Шлугера М.А.* Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. В 2-х томах. – М.: Машиностроение. - 2003. - 302 с.

16. *N. Kanani.* Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice. – Oxford. - 2005. -353 с.

# MICROHARDNESS AND POROSITY OF GALVANIC COATING DURING THE RECOVERY OF THE MIRROR SURFACE OF HYDRAULIC CYLINDER BARRELS

**Rakhimyanov Kh. M.** D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru
**Yanpolskiy V. V.** C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mag07@mail.ru
**Kadyrbaev R. M.** Master Student, e-mail: be.true@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

**Abstract:** The loss of hydraulic cylinders efficiency associated with defects on the working surface of the barrel and piston, such as scratches, chips and tears. This article describes methods of mirror surface recovery of the cylinders barrel and shows that the recovery of defects is possible with the help of electroplating method. Experimental researches of influence of regime plating parameters on the microhardness and porosity of the coating are carried out. The results of measuring the porosity of the coating by metallographic method are shown. Porosity of nickel coating is П=1%, when current density is 9 A/dm2 and electrolyte temperature is 40° C. Microsection of plated samples with dendritic structure and photograph of microhardness measurement are shown. Microhardness of the coating is 280 HV.

**Keywords:** hydraulic cylinder, barrel, electrolyte, temperature of electrolyte, galvanic coating, current density, microhardness, porosity, dendritic structure.

**УДК 621.9.047**

# ИЗЫСКАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ И КРАЙНЕГО СЕВЕРА*

*Ю. Н. САРАЕВ[1,4];*
*Э. С. ГОРКУНОВ[2];*
*Н. И. ГОЛИКОВ[3];*
*А. С. КИСЕЛЕВ[4]*

[1]Институт физики прочности и материаловедения СО РАН;
[2]Институт машиноведения УрО РАН;
[3]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН;
[4]Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055
E-mail:litsin@ispms.tsc.ru

**Аннотация:** В работе рассматриваются вопросы обеспечения эксплуатационной надежности крупногабаритных металлоконструкций ответственного назначения, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера. Развиваемое направление исследований основывается на комплексном применении новых технологий сварки и наплавки, современных сварочных и наплавочных материалов, методов ударной механической обработки, способствующей перераспределению остаточных напряжений в зонах неразъемных соединений, что благоприятно сказывается на качественных и прочных свойствах.

Проводимые исследования связаны с госбюджетной тематикой Института физики прочности и материаловедения СО РАН, а также комплексной программой фундаментальных исследований Президиума РАН по стратегическим направлениям развития науки на 2014 год № 44 «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» (Постановление Президиума РАН от 11.02.2014 г. № 22, проект: «Разработка научных основ повышения эксплуатационных свойств металлоконструкций, используемых в условиях низких температур и арктических льдов, применением адаптивной импульсно-дуговой сварки, модифицирования и механической обработки зон неразъемных соединений»).

**Ключевые слова:** поисковые фундаментальные научные исследования, Арктическая зона, научные основы, эксплуатационные свойства, металлоконструкции, низкие температуры, арктические льды, импульсно-дуговая сварка, модифицирование, механическая обработка, неразъемные соединения.

**Введение.** Промышленное освоение Арктической и прибрежной зоны отдаленных районов Крайнего Севера требует коренного пересмотра вопросов обеспечения эксплуатационной надежности крупногабаритных металлоконструкций и техники специального назначения, используемой для защиты национальных интересов Российской Федерации в этом регионе [1].

В этой связи совершенно очевидно, что одним из направлений комплексных научных исследований Арктической зоны является надежность и живучесть технических систем ответственного назначения при их эксплуатации в условиях северных и арктических территорий. Это связано с тем, что в этих регионах сконцентрирована большая доля природных ресурсов, добыча которых способствует развитию и укреплению экономического потенциала России. Вместе с тем, как уже хорошо показала практика, исчерпание работоспособности машин и механизмов на Севере имеет ускоренный характер [2, 3].

Экстремальные погодно-климатические условия значительно влияют на эксплуатацию техники и конструкций. В основном аварии конструкций сопровождаются их хрупким разрушением при отрицательных температурах эксплуатации. По опыту эксплуатации техники на территории Якутии установлено, что поток отказов ряда деталей и узлов машин, большегрузных самосвалов, карьерных и шагающих экскаваторов и металлоконструкций увеличивается в 2-3 раза, по некоторым данным до 4-6 раз, что наносит экономике России большие убытки. В основном это связано с накоплением технологических эксплуатационных повреждений и возникновением хрупких трещин. Помимо длительного воздействия низких температур существуют другие факторы, усложняющие работу машин, механизмов и агрегатов в условиях криолитозоны. В частности, работа горнодобы-

вающего оборудования связана со знакопеременным и ударным нагружением, осложняется вибрациями и дополнительными нагрузками из-за высокой абразивности многолетнемерзлых пород, смерзаемости грунта, его налипания и намерзания на рабочие элементы [3].

Результаты анализа отказов сооружений подтверждают преимущественное зарождение разрушений в зоне сварных соединений. В магистральных газопроводах более 50% отказов приходится на кольцевые швы с образованием сквозной трещины-свища. Для вертикальных стальных резервуаров в более 80% случаях аварий очагом разрушений является сварное соединение [4-6]. Причинами преждевременных отказов сварных соединений являются дефекты сварки, остаточные сварочные напряжения, низкая сопротивляемость зарождению и распространению трещин зоны термического влияния и металла шва [7]. Таким образом, проблема повышения работоспособности сварных соединений технических систем в условиях экстремальных низких температур, суточного и сезонного колебания температур, характерных для резко континентального климата, эксплуатация в сложных геологических условиях остается до сих пор актуальной [3].

Проблема ремонта и повышения прочности сварных конструкций для районов Сибири и Севера является сложной многофакторной задачей, обусловленной их эксплуатацией в сложных климатических условиях, в частности, очень низких температур, что требует разработки и использования хладостойких материалов, новых технологических процессов изготовления неразъемных соединений и послесварочную обработку [8-10].

**Цель работы:** изыскание путей повышения эксплуатационных показателей металлоконструкций ответственного назначения, работающих в сложно-климатических условиях Сибири и Крайнего Севера.

**Материалы и методика исследования.** Экспериментальные исследования проводились с применением стали 09Г2С. Сварка и наплавка осуществлялись электродами марки УОНИ 13/55 от источника питания ФЕБ-315 «МАГМА» с пультом «Пульс» для реализации импульсно-дугового процесса сварки и подающего механизма ФЕБ-09. Применялись технологии сварки и наплавки на постоянном токе (СПТ) и с модуляцией тока (CMT) – способ адаптивной импульсно-дуговой сварки и наплавки [10].

Регистрация параметров процесса сварки и наплавки осуществлялась с помощью исследовательского комплекса, включающего цифровой запоминающий осциллограф АКИП-4122/1V, токовые клещи РАС-22 для осциллографа, промышленную скоростную видеокамеру Baumer HXC20-F, с комплектом для запуска камер HXC xx Starter Kit и плату захвата изображений на шину PCIEx4, манипулятор для перемещения свариваемых образцов. Кроме того для регистрации усредненных значений энергетических параметров использовался прибор AWR-224 МД. Режимы приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1** – Параметры режима сварки на постоянном токе

| Образец № пп | Слой | $I_д$ ср, А | $U_д$ ср, В | $V_{св}$, м/ч | Уровень погонной энергии, кДж/м |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Корневой | 70 | 20.5 | 4.9 | 938.2 |
| 1 | Облицовочный | 105 | 21.5 | 6.99 | 1009.9 |
| 17 | Корневой | 76 | 20.5 | 4.9 | 1018.7 |
| 17 | Облицовочный | 76 | 21.5 | 6.99 | 731.0 |

Таблица 2** – Параметры режима сварки с низкочастотной модуляцией тока

| Образец № пп | Слой | $I_и$, А | $I_п$, А | $t_и$, с | $t_п$, с | $U_д$ ср, В | $V_{св}$, м/ч | Уровень погонной энергии, кДж/м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | Корневой | 100 | 30 | 0.2 | 0.4 | 19.5 | 4.29 | 803.1 |
| 4 | Облицовочный | 140 | 30 | 0.2 | 0.4 | 21 | 6 | 743.7 |
| 18 | Корневой | 80 | 30 | 0.3 | 0.3 | 19.5 | 4.29 | 828.75 |
| 18 | Облицовочный | 100 | 30 | 0.3 | 0.3 | 21.6 | 6 | 745.9 |

****Примечание:** Дуговая сварка на постоянном токе и с импульсным изменением энергетических параметров режима производилась покрытыми электродами УОНИ 13/55, диаметр 3 мм.

Осциллограммы тока и напряжения дуги в процессе сварки представлены на рис. 1.

Сварные соединения подвергались радиографическому контролю рентгеновским аппаратом «Пион-2М» с применением радиографической пленки РТ-1 по методике ГОСТ 7512-82. Макроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа МБС-10 при 12-ти кратном увеличении, травление макрошлифа проводилось химическим

способом в 4-% растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

Микроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа NEOPHOT-21 при увеличении ×200. Измерение микротвердости сварных соединений и наплавленных покрытий проводили на микротвердомере Leika при нагрузке 50 кгс. Наличие карбида хрома при наплавке определялось рентгеноструктурным анализом на установке ДРОН 3М. Распределение хрома в композиции «наплавленное покрытие – стальная основа (09Г2С)» определялось методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Испытания сварных соединений на ударный изгиб проводили на стандартных образцах типа 13 с V-образным надрезом по ГОСТ 9454-78 с использованием инструментированного маятникового копра «Tinius Olsen IT 542M». Механические испытания на растяжение проводили на образцах по ГОСТ 1497-84 на универсальной испытательной машине УММ-5. Исследования циклической долговечности проводили по ГОСТ 5264-80 на соединениях типа С17. Образцы для усталостных испытаний имели два боковых надреза глубиной 2 мм. Установление местоположения границ шва и зоны термического влияния (ЗТВ) производилось химическим травлением. Циклические испытания образцов при постоянно заданном уровне нагрузки проведены с помощью сервогидравлической машины Instron 8802 при частоте нагружения - 5 кГц. Магнитные характеристики различных участков сварных соединений стали 09Г2С, полученных при различных режимах и параметрах сварки, определяли с использованием магнитно-измерительного комплекса Remagraph C-500. При определении магнитных характеристик в процессе механических испытаний на одноосное растяжение по достижению определенной степени деформации процесс нагружения приостанавливали без разгрузки образца, и с помощью комплекса Remagraph C-

500 регистрировали петли магнитного гистерезиса. Измерения магнитных характеристик материала из различных зон сварных соединений проводили в замкнутой магнитной цепи. Магнитное поле напряженностью до 500 А/см прикладывали вдоль оси образца. Из петель магнитного гистерезиса определяли значения коэрцитивной силы, остаточной индукции и намагниченности.

Макроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа МБС-10 при увеличении х12, травление макрошлифа проводилось химическим способом в 3-% спиртовом растворе азотной кислоты, погружением шлифа до выявления границ сварного шва. Микроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа NEOPHOT-21 при увеличении х200. Измерение микротвердости сварных соединений всех исследованных образцов проводили в поперечном сечении на микротвердомере Leika с шагом 300 мкм при нагрузке 50 кгс.

Фактографическое исследование изломов, после ударных испытаний, проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа «Tescan VEGA II XMU». Перед испытанием образцы были очищены в щелочной ванне с использованием ультразвука. Для фиксации образцов к столику микроскопа был использован специальный токопроводящий графитовый скотч. Сканирование проводилось при ускоряющем напряжении 15 кВ. Использовали детектор EDX. Рабочее расстояние WD Z 15 мм. Диапазон увеличения составил от 18 до 1000 крат.

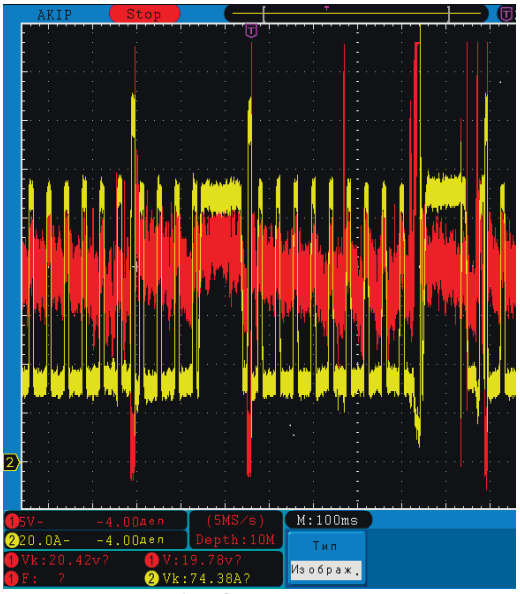



Рисунок 1 – Осциллограммы тока и напряжения дуги при адаптивной импульсно-дуговой сварке, где желтые линии – ток сварки, красные – дуговое напряжение.

Механические испытания материалов на растяжение проводили на цилиндрических образцах с головками, изготовленных по ГОСТ 1497-84, при комнатной температуре на универсальной испытательной машине УММ-5 с максимальным усилием 50 кН. Испытания на ударный изгиб проводили на стандартных образцах типа 13 размером 5 х 10 х 55 мм с V-образным надрезом по ГОСТ 9454-78 и ГОСТ 6996-66 с использованием инструментированного маятникового копра «Tinius Olsen IT 542M», обеспечивающего запись диаграмм ударного нагружения в координатах «нагрузка-перемещение». Испытания при температуре -60°С проводились в смеси жидкого азота и бензина Галоша. Температура контролировалась с помощью поверенного термометра ТН-8М.

Разделение общей работы разрушения при ударных испытаниях на составляющие ударной вязкости (работу зарождения и распространения трещины) проводили на основе анализа экспериментальных диаграмм ударного нагружения в соответствии с рекомендациями ГОСТ 22848-77. Значения параметра динамической трещиностойкости ($J_{1d}$) рассчитывались по формуле: $J_{1d} = 2\ A_з/B(W-a)$, где $A_з$ – работа зарождения трещины; B – ширина образца; W – высота образца; a – длина концентратора напряжений (надреза или усталостной трещины), приведенной в [7]. Полученные значения механических свойств усреднялись по результатам испытаний на растяжение и ударный изгиб не менее 2 образцов.

Испытания на циклическую трещиностойкость основного металла и металла ОШЗ проводились в соответствии с методическими указаниями РД 50-345-82 при комнатной температуре на образцах размером 5 х 10 х 55 мм с V-образным надрезом по схеме трехточечного изгиба с использованием высокочастотной резонансной испытательной машины MIKROTRON. По результатам испытаний строились кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР) в координатах «скорость роста усталостной трещины - размах коэффициента интенсивности напряжений».

Циклические испытания образцов при постоянно заданном уровне нагрузки проводились с помощью сервогидравлической машины Instron 8802, оснащённой электронным блоком управления и компьютерным программным обеспечением Single Axis MAX (SAX). Перед испытаниями на образцах сварных соединений в зоне металла шва (МШ), наносились боковые надрезы. Частота циклического нагружения - 5 кГц. Испытания проводились при малоцикловом растяжении до полного разрушения образцов, с отнулевой характеристикой цикла. Образцы испытывались при двух уровнях нагрузки примерно 330 МПа и 370 МПа, что составляет 0.8 $\sigma_т$ и 0.9 $\sigma_т$ соответственно. Усталостные испытания образцов проводились при комнатной (+20°С) и отрицательной (-40°С) температуре. Охлаждение образцов производилось в климатической камере Instron-SFL, серии 3119

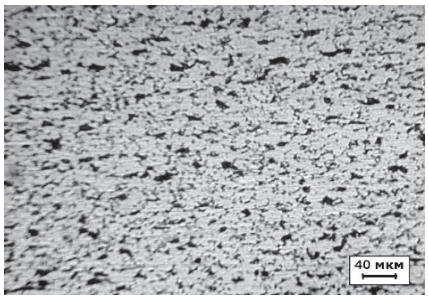



Рисунок 4 – Микроструктура основного металла сварного соединения стали 09Г2С

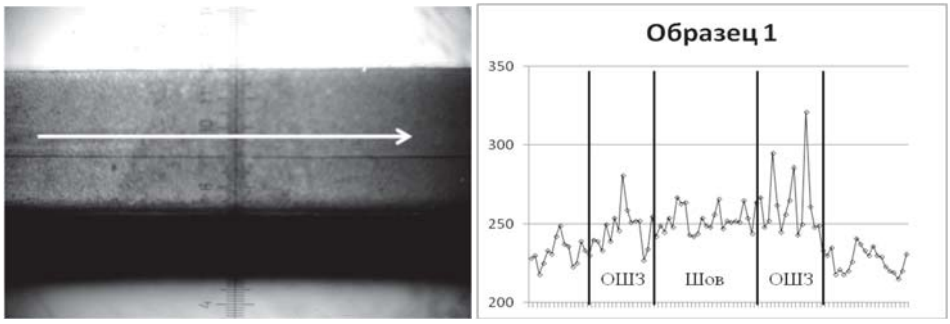



Рисунок 2 – Общий вид зоны сварного шва и распределение микротвердости в образце 1 (СПТ): а – сечение замера микротвёрдости, б – распределение микротвёрдости

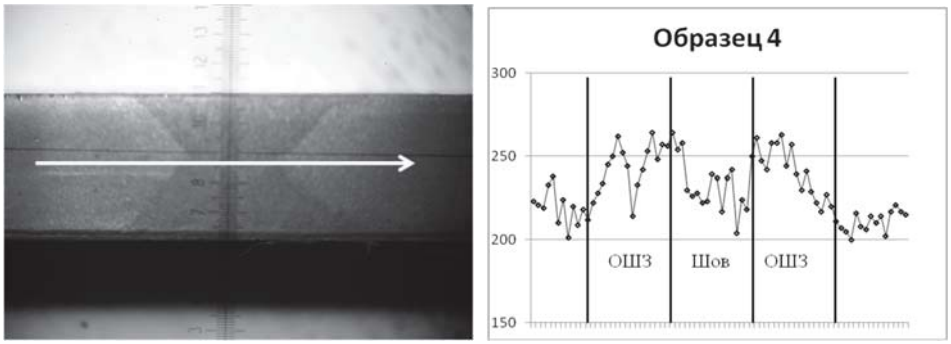



Рисунок 3 – Общий вид зоны сварного шва и распределение микротвёрдости в образце 4 (CMT): а – сечение замера микротвёрдости, б – распределение микротвёрдости

жидким азотом.

**Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение.**

Основной металл - сталь 09Г2С имеет твердость ~ 250 $HV_{0.05}$, материал шва ~ 270 -300 $HV_{0.05}$, околошовной зоны (ОШЗ) ~ 210-230 $HV_{0.05}$.

Согласно общепринятым представлениям разброс значений твёрдости в сварных швах не должен превышать 20 %. Распределение микротвердости для исследованных образцов попадает в 20-% критерий, рис. 2 и 3. На исследованных образцах отсутствуют макродефекты [11-12].

Микроструктура исследованного металла основных материалов в исходном состоянии представляет собой феррито-перлитную смесь с перлитными колониями строчечного типа (рис. 4.)

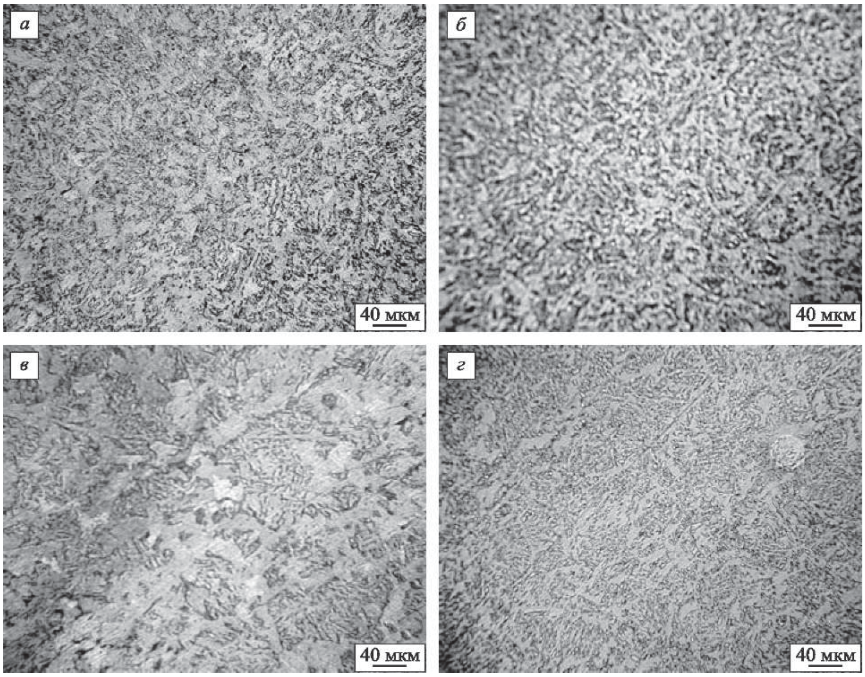



Рисунок 5 – Микроструктура образцов сварного соединения при различных режимах сварки, вырезанных из участков ОШЗ: а - СПТ, б – CMT; металла шва: в - СПТ, г – CMT

Размер зерна составляет в среднем ~ 10 мкм, что соответствует 10 баллу зерна. Размер зерна ОШЗ, как видно из рис. 5, превышает размер исходного зерна, что связано с перегревом металла в процессе сварки. При сварке на постоянном токе зона с укрупненным размером зерна шире (рис. 5 а), чем при сварке с модуляцией тока (рис. 5 б), что позволяет говорить о больших тепловложениях в процессе СПТ и о длительном термическом воздействии горящей дуги [9,10].

Металлографические исследования сварных соединений выявили измельчение ~ в 1,5 раза структурных составляющих материала ОШЗ после CMT, рис. 5 б. Это объясняется особенностями импульсного режима сварки, при котором происходит многократное перемешивание расплава и образование множества новых центров кристаллизации [11].

Результаты механических испытаний на одноосное растяжение металла различных участков сварного соединения приведенные в табл. 4, свидетельствуют о том, что прочностные свойства основного металла стали 09Г2С и материала ОШЗ для различных режимов сварки находятся примерно на одном уровне. При этом в металле ОШЗ наблюдаются более высокие значения временного сопротивления - $\sigma_B$ = 495-510 МПа и относительного сужения $\psi$ = 50-51 % (образцы № 4 и 18 CMT). Важно отметить, что приведенные в табл.4 значения показателя $\sigma_{0.2}/\sigma_B$, рост которого характеризует снижение запаса пластичности металла, для материала шва несколько меньше, чем для основного металла и ОШЗ. Наибольшие значения $\sigma_{0.2}/\sigma_B$ = 0.80-0.81 имеет материал ОШЗ (образцы 4 и 17), что может свидетельствовать о повышенной вероятности протекания хрупкого разрушения именно в этой зоне. Наиболее равнопрочным сварным соединением является сварное соединение, изготовленное по технологии CMT: изменение соотношения прочностных характеристик от зоны к зоне не превышает 2.5%.

У образцов, сваренных с применением CMT, ширина околошовной зоны меньше и в ней не отмечается роста зерна. Это положительно влияет на качество сварного соединения в целом. Феррито - карбидная структура шва

напоминает видмандштеттову. Однако при этом снижения прочностных характеристик (табл. 4), характерного для сталей с видмандштеттовой структурой, не наблюдается. Структуре центра шва, рис. 5 в и г, характерны крупные бейнитные зерна с зернами феррита по границам. Размер зерен в образцах, изготовленных с применением технологии СПТ больше, рис. 5 в, чем у образцов, изготовленных СМТ, рис. 5 г, ~ в 1.5 раза. Это объясняется тем, что структура корневого и заполняющего слоев шва после кристаллизации подвергается повторному нагреву при наложении последующих слоёв [12]. В результате повторного нагрева протекает перекристаллизация (нормализация). В процессе сварки на постоянном токе температура нагрева, корневого и заполняющего слоев шва, выше температуры фазовой перекристаллизации, и, как следствие, происходит рост зерна. В процессе адаптивной импульсно-дуговой сварки вторичный нагрев происходит при температуре, близкой к температуре полиморфоного превращения. Это способствует измельчению структуры и повышению твердости, которая в зоне шва коррелирует с результатами механических испытаний на одноосное растяжение (табл. 4).

Результаты испытаний металла сварного соединения стали 09Г2С на ударную вязкость при комнатной и пониженной температурах приведены в табл. 5.

Испытания показали, что температуре испытаний 20° С, ударная вязкость металла ОШЗ для всех образцов выше, чем основного металла. Максимальная ударная вязкость (KCV = 1.05 МДж/м$^2$) достигается на образцах, вырезанных из ОШЗ, сваренных по технологии СМТ. Наиболее низкие значения KCV = 0.86 МДж/м$^2$ соответствуют металлу ОШЗ, сваренных по технологии СПТ. При этом изломы испытанных образцов имеют вязкое (волокнистое) строение, рис. 6.

При выполнении исследований, особое внимание было уделено модифицированию металла шва специальными композиционными порошками. Так при наплавке в покрытие вводились готовые карбидные соединения для получения структуры наплавленного металла с упрочняющей карбидной фазой, расположенной непосредственно в поле зерна. В качестве модифицирующих смесей применялись порошковые материалы на основе субмикрокристаллических частиц карбидов хрома. Для реализации поверхностного упрочнения были разработаны различные схемы введения порошковых композиций с субмикроразмерными упрочняющими частицами при нанесении покрытий [13-14].

Легирование готовыми соединениями позволило значительно упростить регулирование структуры матрицы сплава, так как при этом перераспределение легирующих элементов между высокотвердой фазой и матрицей замедляется. В структуре сплава наблюдались мелкие карбидные включения, распределенные по всему объему покрытия. В процессе нанесения покрытий вкрапления таких фаз в металлической матрице ведет к формированию дисперсно-упрочненных слоев и повышению физико-механических и эксплуатационных свойств получаемых материалов. Изучение и оптимизация процессов кристаллизации, регулирования температуры расплава за счет ввода в состав наплавочных материалов дисперсных тугоплавких соединений, модифицирующих материал покрытий, включая измельчение их структуры и повышение свойств, позволило провести оптимизацию технологий наплавки.

Таблица 4 – Механические свойства исследованных материалов при испытаниях на одноосное растяжение

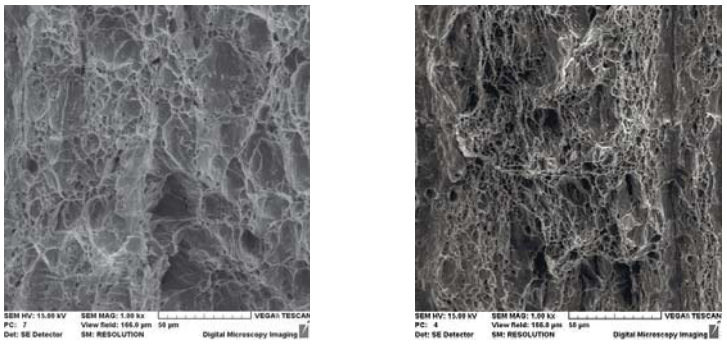
| **Материал** | **$\sigma_{0.2}$, МПа** | **$\sigma_в$, МПа** | **δ, %** | **ψ, %** | **$\sigma_{0.2}/\sigma_в$** |
|---|---|---|---|---|---|
| Основной металл | 375 | 480 | 21 | 38 | 0.78 |
| ОШЗ / №1 | 340 | 450 | 15 | 44 | 0.76 |
| ОШЗ / №4 | 370 | 465 | 17 | 39 | 0.80 |
| ОШЗ / №17 | 375 | 460 | 17 | 43 | 0.81 |
| ОШЗ / №18 | 370 | 470 | 16 | 42 | 0.79 |
| Шов / №1 | 375 | 480 | 11 | 51 | 0.78 |
| Шов / №4 | 370 | 495 | 10 | 50 | 0.74 |
| Шов / №17 | 345 | 495 | 15 | 42 | 0.70 |
| Шов / №18 | 345 | 510 | 18 | 50 | 0.67 |

Таблица 5 – Характеристики ударной вязкости и динамической трещиностойкости различных участков сварного соединения стали 09Г2С

| **Материал (№ образца)** | **$T_{исп.}$,°С** | **KCV, МДж/м$^2$** | **$A_з$, Дж** | **$A_р$, Дж** | **$A_р/A_з$** | **$J_{id}$, МДж/м$^2$** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Основной металл | 20 | 0.85 | 6.86 | 24.74 | 3.61 | 0.37 |
| | -60 | 0.65 | 6.60 | 19.66 | 2.98 | 0.33 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ОШЗ /№1 | 20 | 0.86 | 7.60 | 26.57 | 3.50 | 0.38 |
| | -60 | 0.61 | 7.52 | 16.35 | 2.17 | 0.39 |
| ОШЗ /№ 4 | 20 | 1.05 | 8.49 | 32.19 | 3.79 | 0.44 |
| | -60 | 0.49 | 9.44 | 9.69 | 1.03 | 0.49 |
| ОШЗ /№ 17 | 20 | 1.01 | 6.83 | 32.29 | 4.73 | 0.35 |
| | -60 | 0.47 | 6.10 | 12.74 | 2.09 | 0.26 |
| ОШЗ /№ 18 | 20 | 0.86 | 9.00 | 24.86 | 2.76 | 0.46 |
| | -60 | 0.82 | 10.25 | 22.79 | 2.22 | 0.51 |

где А - полная работа разрушения образца; $A_з$ - работа на зарождение трещины; $A_р$ - работа на распространение трещины; KCV - ударная вязкость; $J_{id,}$ - динамическая трещиностойкость.



а б

Рисунок 6 – Фрактограммы изломов образцов основного металла: а - при температуре 20 °С; б - при температуре -60 °С.

При этом упрочнение достигается путем направленного высокоэнергетического и модифицирующего влияния дисперсных тугоплавких соединений на структуру, физико-механические и служебные свойства покрытий из металлов и сплавов, наносимых методами наплавки. При импульсно-дуговой наплавке в результате действия повторяющегося переменного давления дуги при формировании наплавляемого покрытия металл сварочной ванны осуществляет постоянные возвратно-поступательные движения, благодаря периодическому силовому воздействию дуги с частотой модуляции тока. Такое протекание технологического процесса наплавки позволило обеспечивать периодически повторяющуюся цикличность физических процессов на этапах формирования сварочной ванны и кристаллизации металла покрытия из расплава, что способствовало ее активному перемешиванию. Это перемешивание расплава способствовало выравниванию её теплосодержания и обеспечивало установление требуемого количества расплавленного металла под дугой к началу действия импульса тока, способствуя уменьшению глубины проплавления. Периодическое движение металла в расплаве обеспечивало выравнивание его теплосодержания и способствовало более равномерному распределению легирующих элементов по всему объему наплавляемого металла.

Проведенные исследования показали, что такой комплексный подход повышения свойств сварных соединений и наплавленных покрытий изделий из низкоуглеродистой стали 09Г2С применением метода модифицирования присадочных материалов ультрадисперсными тугоплавкими частицами и импульсной технологии, обладает **новизной и обеспечивает повышение эксплуатационных показателей сварных соединений и наплавленных покрытий**.

Использование в шихте расходных материалов - в электродах и проволоках компонентов, содержащих микролегирующие добавки, позволяет влиять на структуру и свойства формируемого металла – сварного соединения и наплавленного покрытия. При модифицировании измельчается структура металла шва, и, как следствие, повышаются физико-механические и эксплуатационные свойства. **Новизна развиваемого подхода** заключается в обеспечении непрерывного контроля над металлургическими процессами на этапе формирования неразъемных соединений, путем комплексного применения новых присадочных материалов, модифицированных мультифазными композициями, использования оборудования и технологий адаптивной импульсно-дуговой сварки и наплавки, которые позволяют через программируемый ввод тепла в зону сварного соединения управлять процессами плавления и переноса каждой капли электродного металла и, как следствие, обеспечивать формирование дисперсных структур в зонах сварных соединений технических систем, что приводит к повышению сопротивляемости этих соединений замедленному и хрупкому разрушению.

Это позволяет существенно уменьшить степень остаточных деформаций в зонах структурной неоднородности, и, как следствие, повысить эксплуатационную надежность изделий. Использование импульсного режима сварки обеспечивает за счет регулируемого ввода тепла в изделие значительное измельчение структуры металла шва и наиболее подверженной структурным изменениям ЗТВ, в результате чего предотвращается резкое падение микротвердости и прочности в этой зоне, и, тем самым, снижается степень разупрочнения зоны сплавления сварного шва. В совокупности, указанные изменения способствуют снижению послесварочных деформаций и увеличению ударной вязкости сварных соединений.

**Выводы**

1. Предложен новый комплексный подход для решения проблемы повышения эксплуатационной надежности и живучести технических систем ответственного назначения, предназначенных для работы в условиях низких климатических температур Крайнего Севера и Арктики. Такой подход основывается на повышении усталостной и механической прочности сварных соединений, изготавливаемых из современных марок низкоуглеродистых сталей методами адаптивных импульсных технологий сварки.
2. Исследовано влияние энергетических параметров адаптивной импульсно-дуговой сварки на структуру и механические характеристики сварного соединения низкоуглеродистых сталей типа 09Г2С: составляющие ударной вязкости, динамическую и циклическую трещиностойкость различных участков соединений.

Установлено, что применение метода адаптивной импульсно-дуговой сварки позволяет получать сварные соединения низкоуглеродистых сталей типа 09Г2С, обладающие мелкозернистой структурой в металле шва и ЗТВ. Достигаемый эффект основывается на механизме, влияния СМТ на перемешивание расплава с образованием новых центров кристаллизации, что способствует измельчению структурных составляющих 1.5 раза.

3. Экспериментально доказано, что в результате применения адаптивной импульсно-дуговой сварки, за счет регулируемого ввода тепла в изделие, обеспечивается значительное измельчение структуры металла шва и наиболее подверженной структурным изменениям ЗТВ, в результате чего предотвращается резкое падение микротвердости и прочности в этой зоне, и, тем самым, снижается степень разупрочнения зоны сплавления сварного шва. При этом вторичной нагрев происходит в непосредственной близости к температуре полиморфоного превращения, что оказывает заметное влияние на механические характеристики сварных соединений. В совокупности, указанные изменения способствуют снижению послесварочных деформаций и увеличению ударной вязкости сварных соединений.
4. Выявлен механизм роста трещин в зонах шва, термического влияния и основного металла. Определены оптимальные значения энергетических параметров режима, которые обеспечивают наиболее равнопрочные свойства всех зон сварных соединений. При этом изменения соотношений прочностных характеристик отдельных зон сварного соединения не превышают 2.5 % и достигаются наибольшие значения ударной вязкости и показателя динамической трещиностойкости.

Авторы выражают благодарность всем членам междисциплинарной научной группы из ИФПМ СО РАН, ИМАШ УрО РАН, ИФТПС СО РАН и Национального исследовательского Томского политехнического университета за участие в выполнении отдельных разделов проекта.

Экспериментальные результаты были получены с использованием оборудования ЦКП «Станция низкотемпературных натурных испытаний» ИФТПС СО РАН (г. Якутск) и ЦКП «Пластометрия УрО РАН (г. Екатеринбург).

*Работа выполнялась в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук РФ на 2013-2020 гг. и программы фундаментальных исследований Президиума РАН "Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации», шифр: «Арктика-2014».

## Список литературы

1. *Сараев Ю.Н.* Обоснование концепции повышения безопасности и живучести технических систем, эксплуатируемых в регионах Сибири и Крайнего Севера, на основе применения адаптивных импульсных технологий сварки // Тяжелое машиностроение. – 2010. - № 8. – с. 14 – 19.

2. *Ларионов В.П., Слепцов О.И., Сараев Ю.Н., Безбородов В.П.* Новые подходы к разработке современных технологий сварки и нанесения для обеспечения эксплуатационной надежности металлоконструкций и изделий, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера // Вестник академии военных

наук. – 2008. - № 3. – с. 67.

3. *Сараев Ю.Н., Слепцов О.И., Безбородов В.П., Никонова И.В., Тютев А.В.* Анализ усталостного разрушения, структура и свойства сварных соединений трубопроводов, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. - № 8. – с. 18.

4. *Сараев Ю. Н., Безбородов В.П.* Влияние энергетических параметров процессов сварки на структуру и свойства зон сварных соединений низколегированных сталей // Сварочное производство. - 2012. - № 8. - с. 3-5.

5. *Сараев Ю. Н., Безбородов В. П., Григорьева А. А., Голиков Н. И., Дмитриев В. В., Санников И. И.* Распределение остаточных напряжений в сварных соединениях из стали 09Г2С методами адаптивной импульсно-дуговой сварки // Сварочное производство. – 2014. - № 2,. – с. 3 – 7.

6. *Сараев Ю.Н., Полетика И.М., Козлов А.В., Кирилова Н.В., Никонова И.В.* Влияние режима сварки на структуру, распределение твердости и механические свойства в сварных соединениях паропровода // Сварочное производство, 2002, № 8, с. 3-8.

7. *Ботвина Л.Р.* Разрушение: Кинетика, механизмы, общие закономерности. М: Наука, 2008. 334 с.

8. *Сараев Ю.Н.* Управление переносом электродного металла при сварке в среде $CO_2$ с короткими замыканиями дугового (Обзор) // Автоматическая сварка. – 1988. - № 12. – с. 16.

9. *Сараев Ю.Н., Полетика И.М., Козлов А.В., Никонова И.В., Кирилова Н.В., Курдюмова И.А., Екимов В.С.* Управление структурой и свойствами ответственных сварных соединений на основе применения импульсного технологического процесса сварки // Черная металлургия. – 2003. - № 9. – с. 46.

10. *Сараев Ю.Н., Полетика И.М. Козлов А.В., Хомченко Е.Г.* Формирование структуры и свойств сварных соединений в условиях регулируемого тепловложения при импульсно-дуговой сварке // Физическая мезомеханика. - 2005, Т.8. - с.137-140.

11. *Горкунов Э. С., Сараев Ю. Н., Задворкин С. М., Путилова Е. А.* Влияние технологических режимов сварки на физико-механические характеристики металла различных зон сварных соединений низколегированной стали // Вопросы материаловедения. – 2015. - № 1(81). – с. 120 – 126.

12. *Сараев Ю. Н., Безбородов В. П., Григорьева А. А., Лебедев В. А., Максимов С. Ю., Голиков Н. И.* Управление структурой и свойствами сварных соединений технических систем ответственного назначения методами адаптивной импульсно-дуговой сварки // Вопросы материаловедения. – 2015. - № 1(81). – с. 127 – 132.

13. *Киселев А. С., Гордынец А. С., Дедюх Р. И., Сараев Ю. Н., Голиков Н. И.* Повышение эффективности применения дуговой сварки покрытыми электродами при ремонте намагниченных трубопроводов // Вопросы материаловедения. – 2015. - № 1(81). – с. 205 – 209.

14. *Сараев Ю. Н.* Опыт разработки и практического применения адаптивных импульсно-дуговых методов сварки для строительства и ремонта магистральных трубопроводов // Вопросы материаловедения. – 2015. - № 1(81). – с. 210 – 218.

## FINDING WAYS TO INCREASE RELIABILITY STEEL MAINTAINED IN THE CONDITIONS OF SIBERIA AND THE FAR NORTH *

**Saraev Yu. N.** [1, 4]**;**
**Gorkunov E. S.** [2]**;**
**Golikov N. I.** [3]**;**
**Kiselev A. S.** [4]

[1]Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS;
[2]Mechanical Engineering Institute, UB RAS;
[3]Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS;
[4]National Research Tomsk Polytechnic University.
Academic ave., 2/4, Tomsk, 634055, E-mail: litsin@ispms.tsc.ru

**Abstract:** In the paper discusses the issues of operational reliability of large steel structures critical applications operating in Siberia and the Far North. Developing area of research is based on the integrated use of new technologies of welding and surfacing, advanced welding and surfacing of materials, methods, impact machining, promotes redistribution of residual stresses in the areas of permanent connections, which favorably affects the quality and durable properties.

Ongoing studies are related to the state budget theme Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, as well as a integrated program of the Presidium of RAS on the strategic directions of development of science in 2014 number 44 "Search basic research for the development of the Arctic zone of the Russian Federation" (Resolution of the Presidium of the Russian Academy of Sciences 11.02.2014, № 22, the project "Development of scientific bases of increase of operational properties of steel structures used in low temperatures and Arctic ice, using an adaptive pulse-arc welding, modification and machining zones of permanent connections").

**Keywords:** search fundamental research, the Arctic zone, scientific bases, operational properties, metal, low temperatures, Arctic ice, pulsed arc welding, modification, mechanical processing, permanent connections.

**УДК 621.791:72.92**

# НАНЕСЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКОЙ В ВАКУУМЕ

*М. В. РАДЧЕНКО, доктор техн. наук, профессор*
*Ю. О. ШЕВЦОВ, канд. техн. наук, доцент*
*Т. Б. РАДЧЕНКО, доктор техн. наук, профессор*

Радченко М.В. - 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46
Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова
e-mail: mirad_x@mail.ru

**Аннотация:** Существенный резерв увеличения срока службы деталей и инструментов – образование на поверхности этих деталей и элементов слоев и покрытий, обладающих высоким уровнем требуемых функциональных свойств – износостойкости, твердости, коррозионной стойкости и др. Среди существующих энерго- и ресурсосберегающих технологий все более заметную роль приобретают процессы с использованием высококонцентрированных потоков энергии, таких как плазменная струя, световой и лазерный лучи, высокоэнергетические пучки релятивистских электронов и низкоэнергетические электронные пучки. Электроннолучевая наплавка пучками низкой энергии благодаря ряду преимуществ перед другими концентрированными потоками энергии является одним из наиболее перспективных методов нанесения покрытий.

В статье представлены результаты исследований и свойств защитных покрытий, нанесенных порошковой электроннолучевой наплавкой в вакууме на уплотнительные поверхности запорной арматуры и технологические режимы процесса.

**Ключевые слова**: запорная арматура, качество, надежность, электронный луч, порошковая наплавка.

Практика эксплуатации трубопроводной и паровой котельной арматуры показывает, что ее ресурс во многом зависит от качества уплотнительных поверхностей, которые работают в сложных эксплуатационных условиях, а в настоящее время он меньше ресурса других основных элементов трубопроводов и энергетических установок. Арматура предназначена для управления движением, распределением и регулированием расхода потоков жидкостей, газов (паров) путем непосредственного на них воздействия.

По назначению арматуру можно разделить на следующие основные группы [1]: запорная, регулирующая, предохранительная, защитная, фазоразделительная.

В силу наиболее сложных эксплуатационных условий в работе рассматривалась первая группа, в частности вентили с условным диаметром прохода $Д_у$ = 100 мм (номинальным диаметром отверстия в арматуре, служащим для прохода среды.

Для изготовления паровой котельной и трубопроводной арматуры в зависимости от ее назначения и условий работы используются конструкционные и легированные стали – сталь 20, 20ХМЛ, 15Х1М1ФЛ, 20Х1М11Ф11Р, 08Х18Н10Т, 20Х13 и многие другие.

Вентили арматуры выполняются с плоскими, конусными и сферическими уплотнительными поверхностями. Плоские уплотнения используются, в основном, в арматуре с $Д_у$ более 40 мм, предназначенной для пара и жидкостей средних и высоких давлений и температур. Конусные и шаровые (сферические) уплотнения работают в арматуре с $Д_у$ менее 40 мм, для пара и жидкостей высоких давлений и температуры.

Шаровая запорная арматура (со сферическими уплотнительными поверхностями) имеет следующие преимущества в сравнении с традиционными вентилями, задвижками, поворотными заслонками:

1. Низкое гидравлическое сопротивление (в 3...4 раза меньше).
2. Высокий уровень регулировки расхода, давления.
3. Быстрое время срабатывания.
4. Экономный расход жидкости или пара.

Запорную арматуру с такими поверхностями выгодно применять в пульпированных трубопроводах, где взвешенные частицы быстро засоряют обычные задвижки и вентили.

В настоящее время для увеличения срока службы арматуры защитные покрытия на рабочие поверхности наносят, в основном, методом наплавки. Для создания герметичного соединения поверхности притираются до шероховатости $R_a$ 0,025 и плотно сжимают нормальным усилием, что исключает наличие протечек рабочей жидкости или газа.

Уплотнительные поверхности работают в сложных условиях. В процессе работы они находятся в среде водяного пара или жидкости, рабочего давления и температуры. Запирание и отпирание запорных органов происходит многократно в условиях почти сухого трения при высоких контактных давлениях. При неработающем котле (парогенераторе) или трубопроводе уплотнительные поверхности подвергаются коррозионному воздействию конденсата или рабочего тела.

Вышеперечисленные условия работы предъявляют определенные требования к уплотнительным поверхностям паровой котельной и трубопроводной арматуры, и материалам, применяемым для их изготовления. Наплавленный металл уплотнительных поверхностей должен отвечать следующим требованиям [2]:

1. Иметь стабильную структуру и твердость в процессе длительной эксплуатации при рабочих температурах.
2. Быть плотным, не иметь трещин, пор, раковин, сколов и обеспечивать герметичность при эксплуатации.
3. Обладать стабильностью химических и физических свойств в течение установленного срока службы.
4. Обладать достаточным сопротивлением термической и малоцикловой усталости.
5. Обладать стойкостью против образования горячих и холодных трещин при наплавке и иметь твердость больше 45 HRC.
6. Обеспечивать стойкость против задиров при удельных давлениях 1200…1500 кгс/см$^2$.
7. Обладать коррозионной и эрозионной стойкостью в рабочих средах (перегретый пар до температуры T = 515 $^o$C, до давления P = 80 кгс/см$^2$, насыщенный пар до T = 300 $^o$C, до P = 93 кгс/см, агрессивные жидкости).

Для удовлетворения жестких требований в отношении сопротивления изнашиванию, задирам, циклическим нагревам, ударным нагрузкам, коррозии, эрозии уплотнительные поверхности запорной арматуры упрочняются путем электродуговой наплавки под слоем флюса и в среде инертных газов, плазменной наплавки [2]. Наряду с этими традиционными методами все чаще применяют плазменную наплавку с подачей двух токоведущих присадочных проволок, импульсно-дуговую наплавку плавящейся электродной проволокой в среде аргона, а также лазерную наплавку. В качестве наплавочных материалов в арматуростроении применяют следующие материалы:

1. Хромистые стали 48Ж-1 мартенситного класса.
2. Хромоникелевые стали – наплавка электродами ЦН-6Л, ЦН-6М.
3. Сплавы системы Fe-Cr-Ni-Si (Mo, B, Mn) – наплавка электродами ЦН-12Л, ЦН-12М, порошками ПН-АН 34.
4. Сплавы на основе Ni (колмонои).
5. Сплавы на основе Co (стеллиты).

Хромистые стали, широко применяемые для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры, обладают удовлетворительными коррозионными и эрозионными свойствами и имеют твердость наплавленного слоя менее 48 HRC. Но они используются только для наплавки поверхностей, работающих в паровой среде до 400 $^o$C, так как при более высоких температурах значительно снижаются их служебные свойства.

Более высокими коррозионными свойствами по сравнению с хромистыми сталями обладают хромоникелевые нержавеющие сплавы ЦН-6М, ЦН-6Л, но из-за низкой твердости наплавки (28…37 HRC) они также имеют ограниченное применение. Сплавы ЦН-12Л и ЦН-12М из-за неудовлетворительных технологических свойств и недостаточного сопротивления термоусталости не применяются для паровой котельной арматуры, подверженной частым переменным тепловым воздействиям.

Наиболее высокими служебными характеристиками обладают сплавы на основе кобальта – стеллиты (от названия фирмы Delloro Stellit Limited (Англия)). Их применяют для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры фирмы Alfa-Laval (Франция), Siemens (Германия), Johnstone (США), Yamatake-Honeywell (Япония). Но они дороги и с трудом поддаются последующей механической обработке.

Для создания защитных покрытий на уплотнительных поверхностях запорной паровой котельной и трубопроводной арматуры – седел, тарелок и сфер – была предложена разработанная в АлтГТУ в 1985 году технология прямой порошковой электроннолучевой наплавки в вакууме (ЭЛН). Учитывая условия работы пары трения и необходимость обеспечения возможности последующей обработки, материалами для наплавки были выбраны хромоникелевый порошковый сплав ПГ-10Н-01 на тарелки и шаровые поверхности и бронзовый сплав ПГ-19М-01 на седла. Химический состав порошков показан в таблице.

Таблица – Химический состав наплавленных порошков

| Марка | C | Cr | Ni | Si | Fe | B | Al | Cu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ПГ-10Н-01 | 0,6-1 | 14-20 | ост. | 4-4,5 | 3-7 | 2,8-4,2 | - | - |
| ПГ-19М-01 | - | - | - | - | до 5 | - | 8,5-10 | ост. |

Экспериментальные исследования по отработке технологии наплавки осуществлялись на электроннолучевой аппаратуре У-250А с использованием термонакальной пушки У-530М. Благодаря специально сконструированному манипулятору изделия со сферическими рабочими поверхностями с радиусом R = 45 мм в процессе наплавки вращались вокруг двух взаимноперпендикулярных осей относительно неподвижного луча и желоба питателя, что обеспечивало непрерывную наплавку валиков по винтовой линии с коэффициентом перекрытия валиков $K_п$ = 30…40 %.

Исходя из условий обеспечения прочного соединения наплавленного металла с основой и исключения их значительного перемешивания, в результате экспериментальных исследований были установлены следующие режимы ЭЛН:

- ускоряющее напряжение $U_a$ = 22 кВ;
- ток луча $I_л$ - до 100 mA (удельная мощность в пятне нагрева q – до 2,7 Вт/см$^2$) для тарелок и сфер и $I_л$ до 120 mA (q – до 3,4 Вт/см$^2$) для седел;
- окружная скорость вращения изделий – до 3 мм/с;
- массовый расход порошка $G_п$ – до 1 кг/ч;
- развертка луча в две линии с амплитудой A = 5 мм, частотой f = 25 Гц и ускорением на концах отрезков.

Нанесение покрытий без предварительного подогрева изделий привело к появлению в наплавленном слое на сферических поверхностях сетки трещин из-за разности коэффициентов термического расширения наплавленного материала и материала подложки (сталь 20). Поэтому, чтобы исключить эти дефекты, заготовки перед направкой подогревали до температуры 450…550 °С.

Поддержание в процессе наплавки установленного рационального соотношения основных технологических режимов позволило обеспечить толщину наплавленного слоя 1…2 мм, минимальное проплавление подложки и незначительное разбавление наплавленного металла железом (доля материала подложки в наплавленном слое $\gamma_o$ до 5 %).

Сочетание оптимальных режимов и процессов рафинирования и дегазации расплава, проходящих во время наплавки в вакууме, обеспечило, как показывают результаты металлографического и рентгеноструктурного анализа, получение плотной мелкозернистой структуры защитного покрытия (без пор, раковин, неметаллических и газовых включений) с требуемым уровнем функциональных свойств [3].

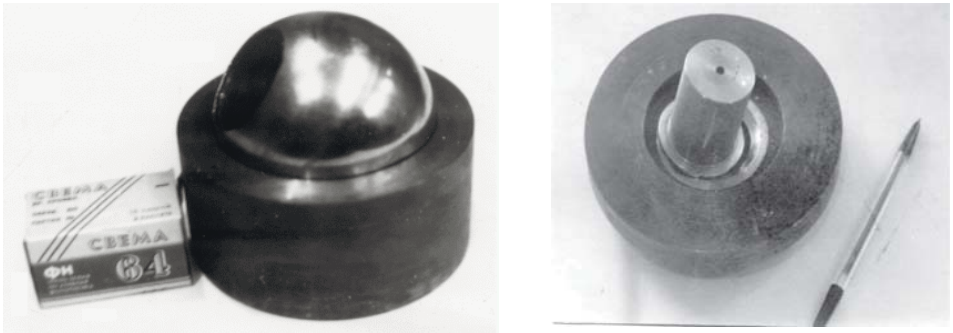
В результате экспериментальных исследований установлено, что наплавленный порошком ПГ-10Н-01 слой металла по технологичности, по стойкости против задиров при сухом абразивном трении и против образования трещин при резких сменах температуры превосходит сплавы на основе кобальта и железа, а использование для наплавки седел бронзового порошка ПГ-19М-01 позволило снизить коэффициент трения в паре седло-палец и седло-сфера с 3,75 до 0,15.

Твердость наплавленных материалов составила 25…30 HRC на седлах и 45…50 HRC на шарах и пальцах, что позволило обрабатывать покрытия на токарных станках с ЧПУ с последующей финишной операцией магнитно-абразивным способом.

На рисунке показана шаровая (а) и плоская (б) запорная арматура с рабочими поверхностями, наплавленными электронным лучом в вакууме.

Длительные производственные испытания на ОАО “ЭТЭМ” (г. С.-Петербург) на базе Центрального котлотурбинного института им. И.И.Ползунова показали повышение стойкости пары трения палец – седло в 2,5 раза по сравнению с выполненными из стали 08Х18Н10Т.

Расчетный годовой экономический эффект от использования созданной технологии упрочнения уплотнительных поверхностей деталей котельной и трубопроводной запорной арматуры на ОАО “ЭТЭМ” составляет 850 тысяч рублей.




а) б)

Рисунок – Запорная арматура с уплотнительными поверхностями, упрочненными методом ЭЛН в вакууме

Таким образом, в результате опытно-конструкторских и технологических исследований показано, что применение в арматуростроении ресурсосберегающей экологически чистой технологии прямой порошковой электроннолучевой наплавки в вакууме позволяет повысить качество защитных слоев металла, достичь высокой надежности и долговечности защищенных узлов, уменьшить расход присадочных материалов, повысить производительность и улучшить условия труда за счет автоматизации процесса.

## Список литературы

1. *Гуревич, Д.Ф.* Расчет и конструирование трубопроводной арматуры.- М.: Машиностроение, 1981.- С. 5-11.

2. *Фрумин, И.И.*, *Гладкий П.В., Переплетчиков Е.Ф.* Опыт применения плазменной наплавки стеллита для ремонта крупных задвижек/ И.И. Фрумин, П.В. Гладкий, Е.Ф. Переплетчиков // Автоматическая сварка.- 1981.- №1.- С. 67-68.

3. *Радченко, М.В.* Комплексный анализ износостойких защитных покрытий, наплавленных электронными пучками в вакууме/ М.В. Радченко, Ю.О. Шевцов, В.Г. Радченко// Ползуновский вестник, 2005.- №2 (ч.2).- Барнаул: Изд-во АлтГТУ.- С. 67-71.

# PRODUCTION OF PROTECTIVE COATINGS ON SEALING SURFACES OF VALVING FITTINGS MADE BY POWDER ELECTRON BEAM CLADDING PROCESS IN VACUUM

**Radchenko M. V.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mirad_x@mail.ru
**Shevtsov Yu. O.**, C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: yuoshevtsov @mail.ru
**Radchenko T. B.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: radchenko_tb@mail.ru

Polzunov Altai State Technical University, 46 av. Lenin, Barnaul, 656031, Russian Federation

**Abstract:** As it's known the essential reserve of increasing of service life of details and tools is formation of special coatings with a high level of operational properties like wear resistance, hardness, corrosion resistance, etc. on a surface of these details.

Among well-known energy-saving and resource-saving technologies some processes based on high concentrated energy streams such as plasma jet, light and laser beams, electron beams in vacuum get more and more appreciable role in industry.

At present an electron-beam cladding in vacuum due to some of advantages in comparison with other energy-concentrated streams is one of the most perspective methods of coating manufacture.

The results of coatings properties investigations, made by electron beam powder cladding process in vacuum on sealing surfaces of valving fittings and technological demands as well, are presented in the article.

**Keywords**: valving fittings, quality, reliability, electron beam, powder cladding process.

**УДК 621.793**

# ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРЕВОВ НА КИНЕТИКУ ФАЗОВЫХ ТРАНСФОРМАЦИЙ В СЛОИСТЫХ ПОКРЫТИЯХ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ НИКЕЛЯ

*В. Г. ШМОРГУН, доктор техн. наук, профессор,*
*А. И. БОГДАНОВ, канд. техн. наук,*
*А. О. ТАУБЕ, аспирант*
*(ВолгГТУ, г. Волгоград, Россия)*

Шморгун В.Г. – 400005, г. Волгоград, пр-т Ленина, 28,
Волгоградский государственный технический университет,
e-mail: mv@vstu.ru

**Аннотация:** С помощью и оптической и электронной металлографии, рентгенографического и энергодисперсионного анализа исследовано влияние температуры изотермического отжига на кинетику фазовых превращений в слоистом покрытии $Ni/Ni_2Al_3$. Показано, что они осуществляются в следующей последовательности $Ni/Ni_2Al_3 \rightarrow Ni/NiAl/Ni_2Al_3 \rightarrow Ni/NiAl \rightarrow Ni/Ni_3Al \rightarrow Ni(Al)$. Установлена длительность фазовых переходов, которая определяется температурой нагрева и начальной толщиной интерметаллида $Ni_2Al_3$.

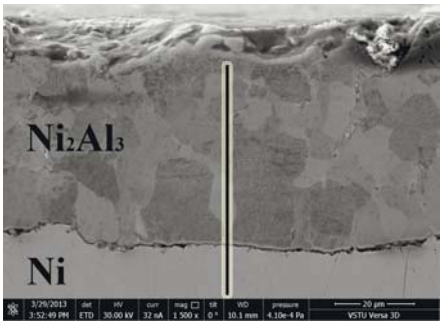
**Ключевые слова:** Алюминиды никеля, покрытие, фазовый состав, диффузия, термообработка

**Введение**

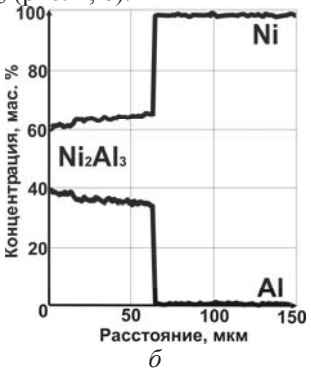
Одним из перспективных методов защиты стальных деталей от высокотемпературного окисления является создание на их поверхности слоистого покрытия $Ni/Ni_2Al_3$ [1, 2], в котором слой никеля предотвращает проникновение атомов алюминия в стальную основу, а алюминид никеля $Ni_2Al_3$ защищает основу от окисления за счет образования на его поверхности плотной оксидной пленки $Al_2O_3$. Срок службы такого покрытия из-за наличия градиента концентраций на границе «никель - алюминид никеля $Ni_2Al_3$» должен определяться кинетикой диффузионных процессов, приводящих согласно диаграмме состояния Al-Ni к последовательному образованию и росту интерметаллидных фаз NiAl, $Ni_5Al_3$ и $Ni_3Al$. Известно [3], что работоспособность алюминидных покрытий ограничивается температурой 1100°С, выше которой резко возрастает поток атомов никеля в покрытие, приводящий к быстрому исчезновению основной фазы NiAl, формирующей защитную плёнку. В связи с изложенным, целью настоящей работы стало исследование влияния высокотемпературных нагревов (900-1000°С) на кинетику фазовых трансформаций в слоистом покрытии $Ni\text{-}Ni_2Al_3$.

**Материалы и методы эксперимента**

Композиционный материал $Ni\text{-}Ni_2Al_3$ с толщиной $Ni_2Al_3$ 50 и 70 мкм (рис.1) получали из сваренной взрывом биметаллической заготовки никель НП2 + алюминий АД1 (толщины слоев 10 и 0,7 мм соответственно) (рис. 2, а), которую подвергали отжигу в воздушной атмосфере печи SNOL 8,2/1100 при 600°С для формирования на межслойной границе между никелем и алюминием диффузионной зоны [4], состоящей из двух интерметаллидных прослоек (со стороны никеля - $Ni_2Al_3$, со стороны алюминия - $NiAl_3$). При охлаждении диффузионная зона под действием термических напряжений [5] разрушалась по $NiAl_3$ (рис. 2, б).

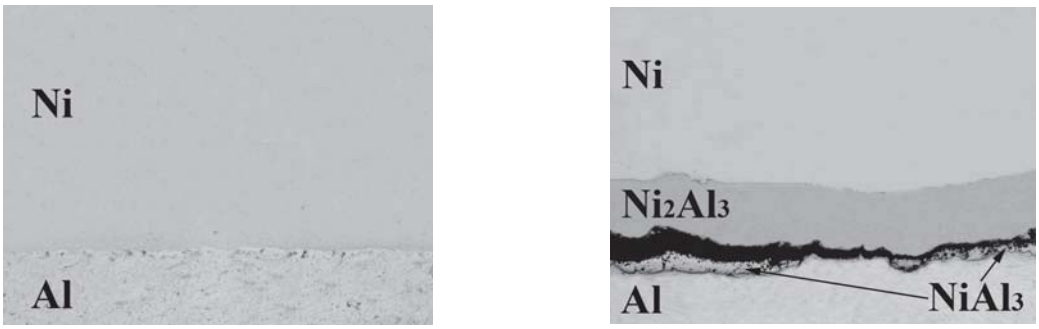



*а*




*б*

Рисунок 1 – СЭМ-изображение композита $Ni/Ni_2Al_3$ (а) и распределение Ni и Al в его поперечном сечении (б).



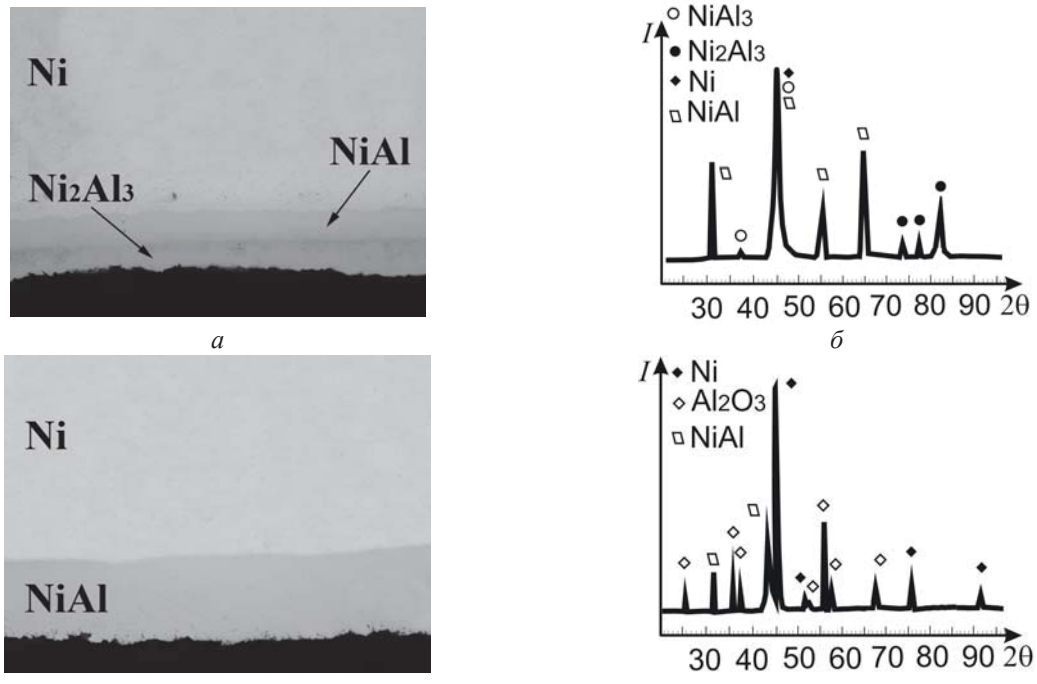

*а* *б*

Рисунок 2 – Микроструктура зоны соединения никель-алюминиевого композита после сварки взрывом (а) и охлаждения после термообработки при температуре 600°С в течение 5 часов (×500).

Металлографические исследования осуществляли с применением оптической (модульный моторизованный микроскоп Olympus BX61) и электронной (растровый электронный микроскоп Versa 3D) микроскопии. Толщину интерметаллидных слоев измеряли при обработке цифровых изображений пакетом программ «AnalySIS» (Soft Imaging System Gmbh) в 20-ти сечениях, перпендикулярных их границе раздела. Рентгеновскую съёмку выполняли на дифрактометре ДРОН-3 в характеристическом излучении $K_{\alpha}Cu$. Для идентификации фаз использовали программу «Crystallographica» (Oxford Cryosystems Ltd) с базой данных Powder Diffraction File-2 (The International Center for Diffraction Data). Микрорентгеноспектральный анализ проводили с использованием энергодисперсионного спектрометра EDAX Trident XM 4.

**Результаты и их обсуждение**

Анализ полученных экспериментальных данных позволил установить следующее. Выдержка покрытия Ni-$Ni_2Al_3$ (толщина $Ni_2Al_3$ 50 мкм) в течение 2 часов при 1000°С привела к образованию между слоем никеля и $Ni_2Al_3$ интерметаллидной прослойки NiAl толщиной ~25 мкм (рис. 3, *а, б*. После 4-часовой выдержки был обнаружен только интерметаллид NiAl (рис. 3, *в, г*). На дифрактограмме присутствовали также рефлексы от $Al_2O_3$, что свидетельствовало о формировании на поверхности алюминида NiAl оксидной пленки. Выдержка в течение 50 часов привела к трансформации фазы NiAl в фазу $Ni_3Al$, а между слоем никеля и интерметаллидной прослойкой $Ni_3Al$ образовался твердый раствор Ni(Al) – никелевый аустенит переменной концентрации (рис. 3, *д, е*). Увеличение времени выдержки до 100 часов привело к расширению зоны твердого раствора за счет уменьшения прослойки $Ni_3Al$ (до 15 мкм) и слоя никеля (рис. 4).




*а* *б*

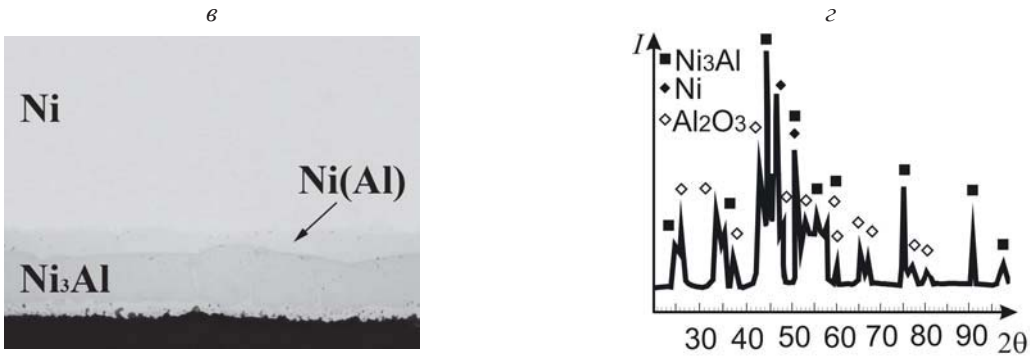



Рисунок 3 – Микроструктуры (×500) покрытия $Ni/Ni_2Al_3$ после отжига при температуре 1000°C в течение 2 (а), 10 (в), 50 (д) часов и соответствующие им дифрактограммы (б, г, е).

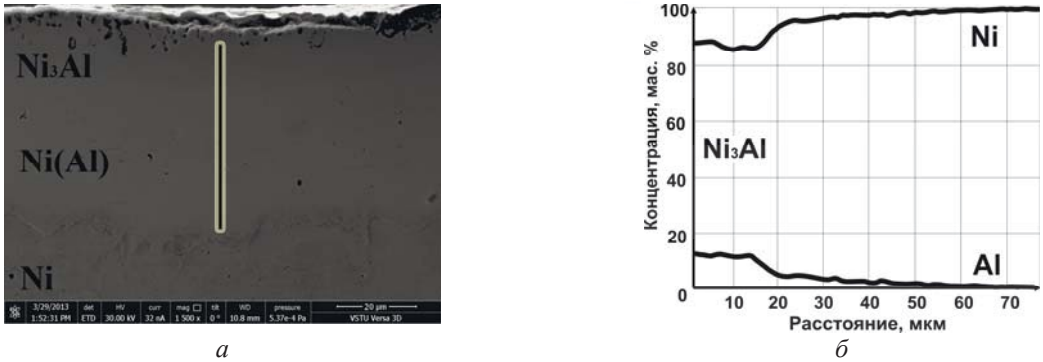



Рисунок 4 – СЭМ-изображение реакционной зоны (а) и распределение Ni и Al в ее поперечном сечении (б) после отжига при 1000°C в течение 100 часов.

Снижение температуры изотермического отжига с 1000 до 900°C существенно замедлило кинетику фазовых превращений. Так, например, если при 1000°C для фазового перехода $Ni_2Al_3$ → NiAl было достаточно 4 часов, а NiAl → $Ni_3Al$ – 30 часов, то при 900°C – 15 и 150 часов, соответственно.

Зависимость длительности фазовых превращений от толщины слоя $Ni_2Al_3$ сходна с соответствующей зависимостью от температуры. Так, увеличение толщины $Ni_2Al_3$ с 50 до 70 мкм позволило при 1000°C увеличить продолжительность фазового перехода $Ni_2Al_3$→ NiAl с 4 до 8 часов, NiAl → $Ni_3Al$ с 30 до 58 часов, а $Ni_3Al$ →Ni(Al) с 320 до 628 часов.

**Выводы**

1. Фазовые превращения в слоистом композите $Ni/Ni_2Al_3$ при нагревах до 900-1000°C идут в следующей последовательности $Ni/Ni_2Al_3$→ $Ni/NiAl/Ni_2Al_3$ → Ni/NiAl → $Ni/Ni_3Al$ →Ni(Al). Длительность фазовых переходов определяется температурой нагрева и начальной толщиной интерметаллида $Ni_2Al_3$.

2. Увеличение толщины каждого последующего слоя интерметаллида происходит, в основном, за счет изменения толщины слоя никеля, а интенсивность роста и исчезновения интерметаллидных прослоек в составе композита определяется температурно-временными условиями нагрева.

**Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 14-19-00418.

## Список литературы

1. A Phenomenological Model for Lifetime Design of $Ni_2Al_3$/Ni Hybrid Coating Formed on Creep Resistant Ferritic Steels/ Z. D. Xiang [et al]// Journal of Materials Science.- 2011.-Volume 47.- №1.- P. 257-266.

2. Steam Oxidation Resistance of Ni-aluminide/Fe-aluminide Duplex Coatings Formed on Creep Resistant Ferritic Steels by Low Temperature Pack Cementation Process/ Z. D. Xiang [et al]// Corrosion Science.- 2011.- №53.- P. 496-502.

3. *Поклад, В. А.* Покрытия для защиты от высокотемпературной газовой коррозии лопаток ротора турбины ГТД /В. А. Поклад, Ю. П. Шкретов, Н. В. Абраимов //Двигатель.- 2010.-№ 4(70).– С. 4-8.

4. *Шморгун, В.Г.* Кинетика диффузионных процессов в никель-алюминиевой композиции / В.Г. Шморгун, Ю. П. Трыков, О.В. Слаутин, В.В. Метелкин, А.И. Богданов// Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.- 2008. - № 4. – С. 24-28.

5. *Шморгун, В.Г.* Оценка термических напряжений в сваренном взрывом слоистом композите сталь + никель + алюминий после термообработки / В.Г. Шморгун, А.И. Богданов, Ю. П. Трыков// Деформация и разрушение материалов.- 2013.-№9.- С.43-46.

## EFFECT OF HIGH TEMPERATURE HEATING ON THE KINETICS OF PHASE TRANSFORMATIONS IN LAYERED COATINGS BASED ON NICKEL ALUMINIDE

**Shmorgun V. G.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mv@vstu.ru,
**Bogdanov A. I.**, C.Sc. (Engineering), e-mail: bogarty@mail.ru,
**Taube A. O.**, postgraduate, e-mail: alekstaube@yandex.ru

Volgograd State Technical University, 28, Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation

**Abstract**: The effect of temperature of isothermal annealing on the kinetics of phase transformations in layered composite $Ni/Ni_2Al_3$ is investigated by optical and electron metallography, X-ray diffraction and energy dispersive analysis. It is shown that transformations are realized in the following sequence $Ni/Ni_2Al_3 \rightarrow Ni/NiAl/Ni_2Al_3 \rightarrow Ni/NiAl \rightarrow Ni/Ni_3Al \rightarrow Ni(Al)$. The duration of the phase transitions is established. Shown that the duration of this processes is determined by the temperature of heating and the initial thickness of the intermetallic layer $Ni_2Al_3$.

**Keywords:** Nickel aluminide, coating, phase composition, diffusion, heat treatment.

**УДК 621.7-97**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СВАРЕННОГО ВЗРЫВОМ МЕДНО-АЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА*

*Д. В. ПРОНИЧЕВ[1], канд. техн. наук, доцент,*
*Л. М. ГУРЕВИЧ[1], доктор техн. наук, доцент,*
*М. Д. ТРУНОВ[1], магистр техники и технологии,*
*В. М. ЯСТРЕБОВ[1], магистр техники и технологии*
*([1]ВолгГТУ, г. Волгоград, Россия)*

Гуревич Л. М. – 400005, г. Волгоград, проспект имени В.И. Ленина, 28,
Волгоградский государственный технический университет,
e-mail: mv@vstu.ru

**Аннотация:** В рамках данной работы исследована микроструктура, теплопроводность и твердость слоистого медно-алюминиевый композита полученного сваркой взрывом. Исследования микроструктуры позволили выделить четыре типа структуры зоны соединения композита, образующиеся в ходе сварки взрывом. Чем больше значение энергии $W_2$, выделяющейся при сварке взрывом, тем больше оплавов содержит зона соединения. Оплавы и интерметаллидные прослойки значительно снижают теплопроводность исследуемого композита.

**Ключевые слова**: алюминий, медь, интерметаллид, сварка взрывом, теплопроводность.

**Введение**

Известно [1], что при сварке взрывом (СВ) в околошовной зоне (ОШЗ) возможно формирование нескольких видов физической и химической неоднородностей, например, непровары, зоны максимального упрочнения (ЗМУ), локальные участки оплавленного металла. К наиболее опасным видам химической неоднородности относятся хрупкие локальные включения оплавленного металла, образующиеся при завышенных режимах СВ разнородных металлов. Наиболее часто для оценки теплоты, выделяемой в ОШЗ, а, следовательно, и возможности появления оплавов применяют параметр $W_2$ – удельная кинетическая энергия, затраченная на пластическую деформацию прилегающих к границе соединения слоев соударяемых пластин. Появление физической и химической неоднородностей изменяет не только механические, но и теплофизические свойства сваренных взрывом слоистых композитов, что особенно важно при изготовлении теплообменных и теплозащитных элементов, однако этот вопрос практически не освящается в технической литературе.

Целью настоящей работы является исследование влияния зоны максимального упрочнения и оплавов, возникающих при сварке взрывом, на теплопроводность композита алюминий-медь, одного из наиболее перспективных для изготовления теплообменной аппаратуры.

**Материалы и методика исследований**

Исследования проводили на биметалле АД1+М1, полученном СВ на режимах, обеспечивающих реализацию изменения энергии $W_2$ в диапазоне 0,8–2,3 МДж/м$^2$. Исследования микроструктуры осуществлялись на модульном моторизированном микроскопе Olympus BX-61, оборудованном цифровой камерой DP-12, для обработки изображений и измерения параметров структуры использован программный комплекс AnalySIS. Измерения микротвердости проводились методом восстановленного отпечатка на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 20 г. Эквивалентный коэффициент теплопроводности определялся на компьютерном измерителе Теплофон КИТ-02ц с погрешность измерения не более 3%.

**Результаты и обсуждение**

Металлографические исследования позволили выделить 4 типа микроструктур, которые образовались в указанном диапазоне $W_2$ на в околошовной зоне композита алюминий-медь.

Первый тип микроструктуры образовывался при $W_2 \approx 0{,}8\text{-}1{,}1$ МДж/м$^2$ и характеризуется качественным соединением алюминия и меди при отсутствии волнового профиля, оплавов и непроваров (рис. 1, а). Микротвердость основных слоев алюминия и меди находится на уровне 0,2 и 0,4 ГПа, соответственно. Толщина ЗМУ в меди – 150-200 мкмс максимальной твердостью 1,1 ГПа.

Для второго типа микроструктуры околошовной зоны, формирующегося при $W_2 \approx 1{,}1\text{-}2{,}0$ МДж/м$^2$, характерно образование локальных оплавов, относительная протяженность которых ниже 80% (рис. 1, б). Толщина ЗМУ в меди остаются практически на том же уровне, что и в первом типе (около 150 мкм), однако твёрдость повышается до 1,2 ГПа. Микротвердость оплавов составила 1,4 ГПа, в теле оплавленных

включений наблюдались трещины, перпендикулярные границе соединения.

Структуры третьего типа возникали при $W_2$≈2,0-2,45 МДж/м$^2$, при этом граница соединения имела регулярный волнообразный профиль, участки оплавов находились в областях выступов волны в алюминии, в выступах волны в меди оплавление не наблюдалось (рис. 1, в). Участки локальных оплавов имели толщину до 50 мкм и твердость до 3,7 ГПа. Повышение твердости локальных оплавов по сравнению с твердостью исходных металлов, по-видимому, связано с появлением фрагментов интерметаллидной фазы. В меди сохранялась зона максимального упрочнения толщиной около 170 мкм с твердостью до 1,5 ГПа.

При $W_2$≈2,4-2,58 МДж/м$^2$ формировалась структура четвертого типа, в которой оплавившиеся из-за интенсивного выделения тепла в деформируемой меди фрагменты алюминия находились в медном слое на значительном расстоянии (до 450 мкм) от границы соединения (рис. 1, г). Во включениях оплавленного металла твердостью до 3,2 ГПа (в зонах волны и обособленных фрагментов) присутствовали мелкие усадочные раковины без кристаллизационных трещин. Измерением микротвердости показана полнота протекания рекристаллизационных процессов в ОШЗ медного слоя, твердость которой (0,4 ГПа) соответствовала твердости по всему сечению.

На представленной на рис. 2 зависимости относительной протяженности и толщины оплавов в биметалле алюминий-медь от энергии $W_2$ изломы кривых соответствуют границам зон формирования одного из четырех типов описанных выше микроструктур.

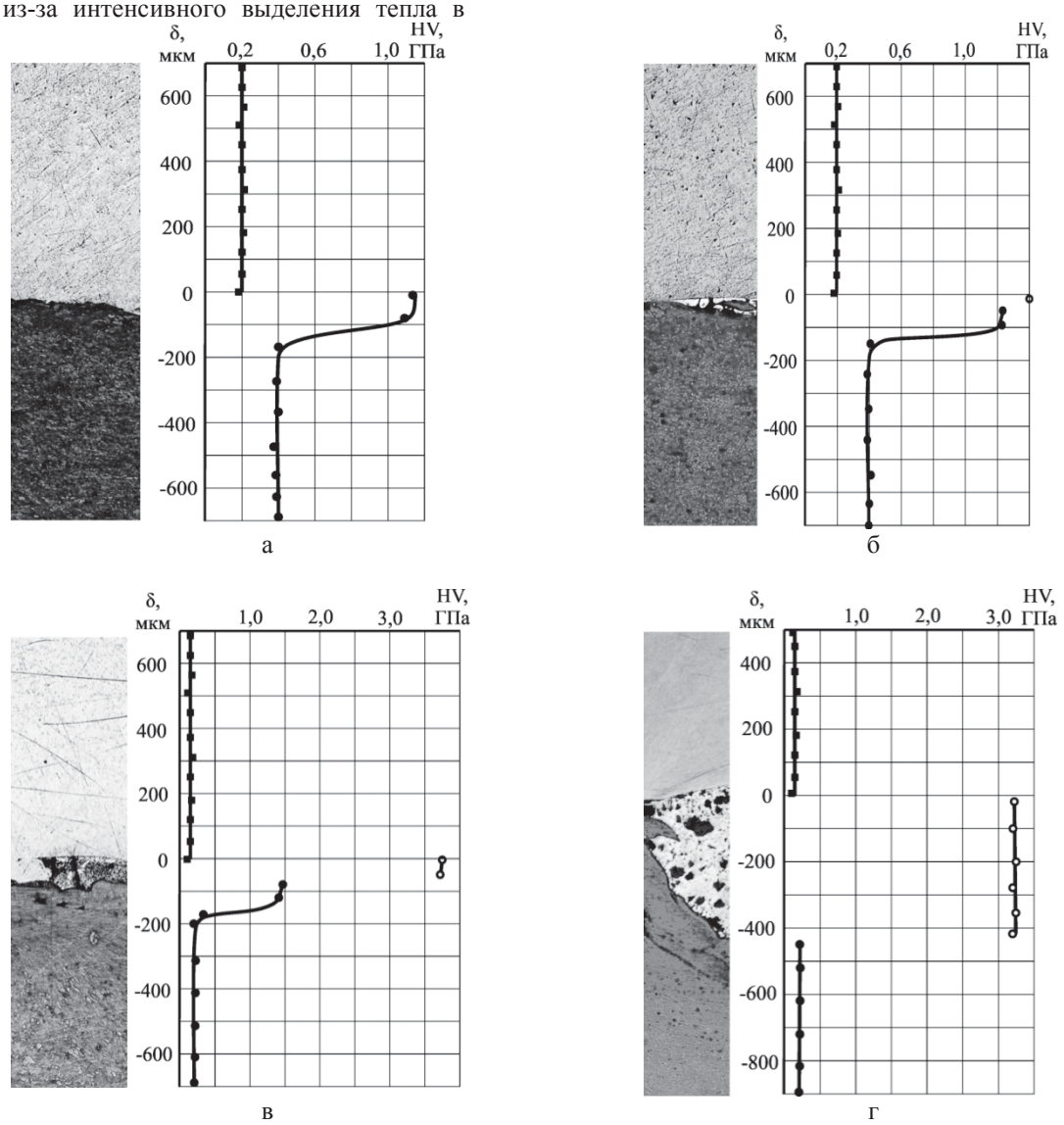



Рисунок 1 – Микроструктура и распределение микротвердости в характерных зонах КМ алюминий-медь: а – $W_2$~0,8-1,1 МДж/м$^2$; б – $W_2$~1,1-2, МДж/м$^2$; в – $W_2$~2,0-2,45 МДж/м$^2$; г – $W_2$~2,4-2,58 МДж/м$^2$.

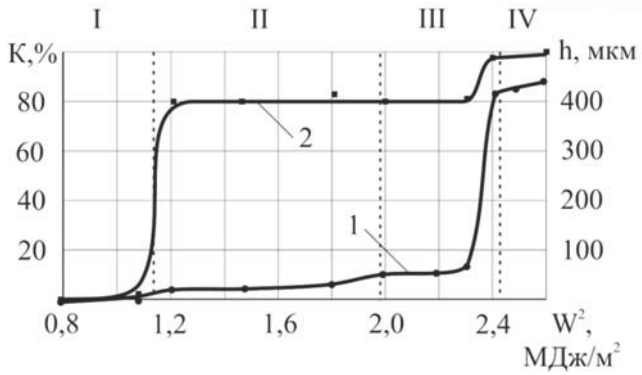



Рисунок 2 – Зависимость толщины (1) и относительной протяженности оплавов (2) в биметалле алюминий-медь от энергии $W_2$

Для определения влияния возникающих при сварке взрывом физической и химической неоднородностей (зон максимального упрочнения и локальных оплавов) на эквивалентный коэффициент теплопроводности КМ алюминий-медь были вырезаны из характерных зон образцы, у которых определялись толщины основных слоев ($\delta_{Cu}$ и $\delta_{Al}$) и ОШЗ ($\delta_{ОШЗ}$), а также измерялся эффективный коэффициент теплопроводности на приборе КИТ-02ц КБ «Теплофон». Экспериментальные значения эквивалентного коэффициента теплопроводности биметалла не превышали 70% от теоретических, рассчитанных без учета структурных несовершенств по (1) [2], а при формирования четвертого типа микроструктуры с оплавленными фрагментами алюминия, визуально изолированными от границы соединения ($W_2$>2.2 МДж/м$^2$) падение достигало 43%.

$$\lambda_{CKM} = \frac{\delta_{Cu} + \delta_{Al}}{\frac{\delta_{Cu}}{\lambda_{Cu}} + \frac{\delta_{Al}}{\lambda_{Al}}}, \qquad (1)$$

где $\lambda_{СКМ}$, $\lambda_{Cu}$, $\lambda_{Al}$, $\delta_{СКМ}$, $\delta_{Cu}$, $\delta_{Al}$– коэффициенты теплопроводности и толщины слоев, соответственно композита, меди, алюминия и околошовной зоны

Расчет теоретических значений эквивалентного коэффициента теплопроводности СКМ как многослойной стенки АД1+ОШЗ+М1 позволял оценить по экспериментальным данным коэффициент теплопроводности ОШЗ $\lambda_{ОШЗ}$ (2) [3], в которой располагались изучаемые виды неоднородности (ЗМУ и оплавы) полученного сваркой взрывом композиционного материала [4]:

$$\lambda_{ОШЗ} = \frac{\delta_{ошз}}{\frac{\delta_{КМ}}{\lambda_{КМ}} + \frac{\delta_{Cu}}{\lambda_{Cu}} + \frac{\delta_{Al}}{\lambda_{Al}}}. \qquad (2)$$

На рис. 3 представлена полученная зависимость коэффициента теплопроводности ОШЗ КМ алюминий-медь от энергии $W_2$. Снижение $\lambda_{ОШЗ}$ с 48 до 25 Вт/(м К) при росте $W_2$ объясняется появлением локальных оплавов с высоким содержанием кристаллизационных дефектов и алюминидов меди. В отечественной и зарубежной литературе отсутствуют данные по теплопроводности алюминидов меди, но приведено их удельное электросопротивление, находящиеся для большинства фаз за исключением на уровне 0,1-0,18 Ом·мм$^2$/м, что, примерно 4-6 раз выше, чем чистого алюминия [5]. Учитывая закон Видемана – Франца, можно предположить, что и коэффициент теплопроводности алюминидов меди в 4 – 6 раз выше, чем у алюминия, то есть составлять 35-50 Вт/(м К).

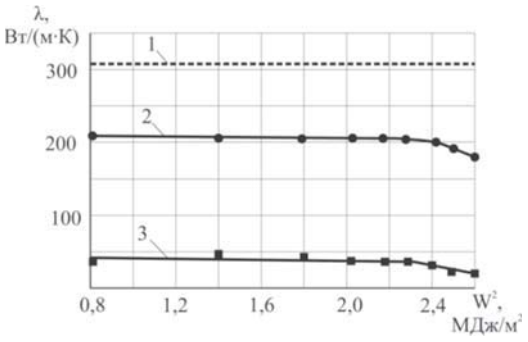



Рисунок 3 – Зависимость теплопроводности СКМ алюминий-медь (теоретическая (1) и экспериментальная (2) и ОШЗ (3) от энергии $W_2$

**Выводы**

1. Проведенные исследования показали возможность формирования четырех типов микроструктур на границе соединения сваренных взрывом алюминия и меди при варьировании в широком диапазоне энергии W2

2. Изучено влияние физической и химической неоднородности на эффективный коэффициент теплопроводности сваренного взрывом слоистого композита алюминий-медь и определены коэффициенты теплопроводности околошовной зоны при различных энергиях $W_2$.

## Список литературы

1. *Седых В. С.* Особенности микронеоднородности сваренных взрывом соединений / Седых В.С. // Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Волгоград: ВПИ.– 1975.– С. 3-39.

2. *Трыков Ю.П.* Теплопроводность медно-алюминиевого композита/ Трыков Ю. П., Проничев Д. В., Гуревич Л. М., Слаутин О. В., Волчков А. В.// Технология металлов.– 2007.– №7.– С. 31-35

3. *Проничев Д.В.* Исследование теплопроводности слоистых металлических композитов/ Проничев Д.В., Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Слаутин О.В.// Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. научн. ст. №5/ ВолгГТУ.–Волгоград, 2007.– С.34-36.

4. *Проничев Д.В.* Исследование теплопроводности диффузионных прослоек, полученных в слоистом композите алюминий-медь в жидкой фазе/ Проничев Д.В., Трыков Ю.П., Арисова В.Н., Трунов М.Д.// Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. научн. ст. №6/ ВолгГТУ.–Волгоград, 2012.– С.43-46.

5. *Рябов, В.Р.* Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами / В. Р. Рябов.- Киев: Наукова думка, 1983. 262с.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00158)

## THE IMPACT OF SOFT INTERLAYER WIDTH ON THE STRESS-STRAIN STATE OF TI-AL COMPOSITE WITH ELLIPTICAL HOLE

**Pronichev D. V.**[1], C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: avatar@mail.ru
**Gurevich L. M.**[1], D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: leongur666@gmail.com
**Trunov M. D.**[1], M.Sc. (Engineering), e-mail: Mikhail.trunov@gmail.com
**Yastrebov V. M.**[1], M.Sc. (Engineering), e-mail: mv@vstu.ru

[1]Volgograd State Technical University, 28, Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russia

**Abstract:** In this study microstructure, heat conductivity and hardness of explosion welded Cu/Al laminated metal composite were investigated. Microstructure study revealed four types of the bond area of the composite, which emerged during explosion welding. The increase in W2 energy value during explosion welding contributed to the growth of molten zones in the bond area of the composite. Molten zones and intermetallic interlayers decrease the heat conductivity of the composite.

**Keywords***:* aluminum, copper, intermetallic, explosion welding, heat conductivity.

**УДК 621.793.74**

# ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА[1]

*Ю. С. ЧЁСОВ, канд. техн. наук, доцент,*
*Е. А. ЗВЕРЕВ, канд. техн. наук, доцент,*
*В. Ю. СКИБА, канд. техн. наук, доцент,*
*Н. В. ПЛОТНИКОВА, канд. техн. наук, доцент,*
*П. В. ТРЕГУБЧАК, ассистент,*
*Д. Ю. ЗАРУБИН, магистрант,*
(*НГТУ, г. Новосибирск*)

**Зверев Е.А.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: egor_z@ngs.ru

**Аннотация:** Приведены результаты металлографических исследований микроструктуры износостойких плазменных покрытий из высокохромистого чугуна после высокоэнергетического воздействия токами высокой частоты. Они показали, что в структуре покрытий практически исчезли поры, нерасплавленные частицы и несплошности на переходной границе. В отличие от исходной структуры распределение микротвердости по глубине слоя становится практически равномерным, хотя ее уровень остается на значениях среднего исходного. Наблюдается фактическое спекание плазменного покрытия с основой. Осуществлены сравнительные испытания на износостойкость в условиях трения скольжения образцов с исходной структурой и структурой, полученной после воздействия индукционного нагрева. Показано, что повышения уровня износостойкости не наблюдается.

**Ключевые слова:** износостойкость, индукционный нагрев, качество, структура, плазменные покрытия.

**Введение**

Качество поверхностного слоя зависит главным образом от характера структуры, которая закономерно предопределяет уровень твердости и характер ее распределения по глубине слоя, знак и величину остаточных напряжений, а, следовательно, и эксплуатационные свойства деталей машин и технический ресурс работы оборудования в целом. Для обеспечения требуемого уровня качества в технологии машиностроения применяют различные методы поверхностного упрочнения, в том числе и процесс плазменного напыления износостойких покрытий. Несмотря на достоинства, присущие данному методу, ему свойственны и недостатки, обусловленные нестабильностью показателей качества напыленного слоя: степень расплавленности порошкового материала, количество и размер пор, а также характер границы между покрытием и основой [1, 2]. От этих показателей зависят адгезионная прочность и уровень остаточных напряжений в слое покрытия. Так, относительно невысокий уровень адгезионной прочности при высоких контактных давлениях может являться причиной нарушения сплошности поверхности плазменных покрытий в виде отслоений и сколов частиц покрытия в процессе эксплуатации оборудования, что, естественно, ограничивает его технический ресурс.

Традиционные технологии нанесения плазменных покрытий практически полностью исчерпали свои потенциальные возможности, поэтому в последнее время с целью повышения качества покрытий все более широкое применение получают так называемые комбинированные технологии [3, 4]. Сущность комбинированных технологий заключается в повторном высокоэнергетическом воздействии на поверхность покрытий с целью улучшения их качественных показателей: увеличение адгезионной прочности, уменьшение пористости, ликвидация нерасплавленных частиц порошка в структуре покрытий, формирование мелкодисперсной структуры и обеспечение равномерного распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя.

В результате сравнительного анализа возможных вариантов повторного высокоэнергети-

[1]Работа выполнена при финансовой поддержке проекта, выполняемого в рамках гранта РФФИ в 2015г. и в плановом периоде в 2013-2015 гг. (Номер проекта 13-08-01102 А "Проектно-исследовательская разработка технологической установки для плазменно-механической обработки

ческого воздействия на плазменные покрытия установлено, что с позиции практического использования в промышленности наиболее рациональным методом является высокоскоростной нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ). Характерной особенностью этого процесса является то, что источник нагрева является объемным и выделение энергии осуществляется на некоторой глубине поверхностного слоя, величина которого зависит от теплофизических свойств и удельного электрического сопротивления материала покрытия, а также частоты тока. Кроме того, современные высокоэнергетические индукционные установки обладают высоким коэффициентом полезного действия, небольшими габаритами и массой, позволяют управлять глубиной температурного воздействия и обеспечивают высокую скорость нагрева [5-7]. Ранее нами уже были исследованы технологические возможности этого подхода с изучением качества полученных покрытий.

Целью настоящей работы является исследование износостойкости плазменных покрытий после повторного воздействия на них индукционного нагрева.

**Методика проведения экспериментов**

Нанесение плазменных покрытий из промышленного высокохромистого чугуна марки ПГ-С27 с фракционным размером частиц 50…100 мкм на плоские образцы из стали 20 производили на установке "Киев-7" плазмотроном ПУН-8 мощностью 40 кВт [8]. Режимы напыления: сила тока дуги плазматрона $I$ = 140 А, напряжение $U$ = 140 В и дистанция напыления $L$ = 110 мм.

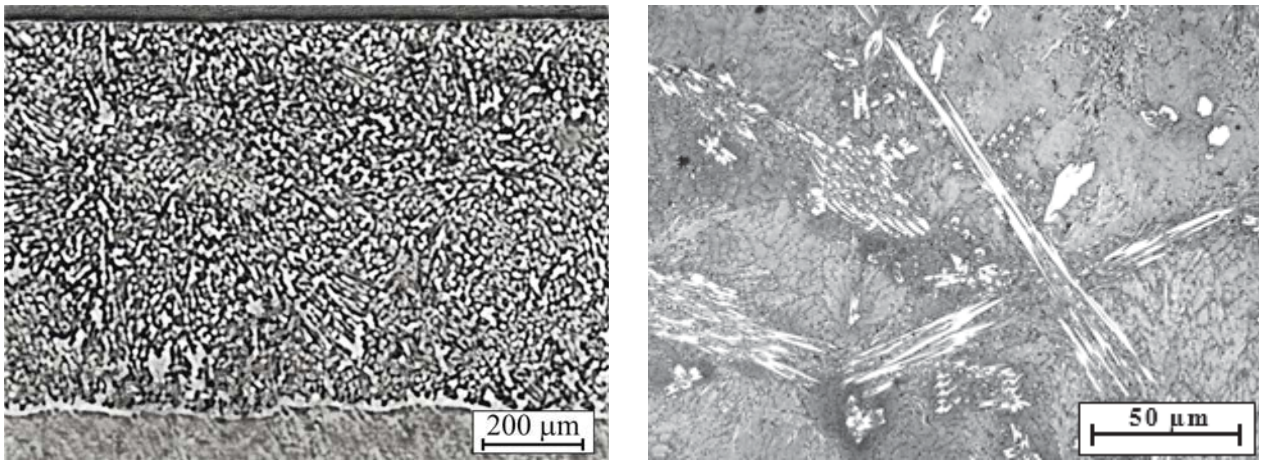
Оплавление поверхности образцов осуществляли на экспериментальной установке, снабженным приводом главного движения с плавным регулированием скорости. В качестве источника энергии использовали ламповый генератор модели ВЧГ 6-60/0,44 с рабочей частотой тока 440 кГц. Процесс нагрева производили по глубинной схеме (глубина выделения энергии порядка 0,6…0,8 мм) непрерывно-последовательным способом. При повторном упрочнении использовали индуктор петлевого типа, оснащенный магнитопродом марки *N*87. Удельная мощность нагрева варьировалась в пределах от $2{,}8\cdot10^8$ Вт/м$^2$ до $3{,}4\cdot10^8$ Вт/м$^2$, а скорость перемещения образцов относительно петлевого индуктора – от 20 мм/с до 120 мм/с [9].

Для испытания стойкости покрытия на износ в условиях трения скольжения использована схема "врезающегося индентора" [10]. Она позволяет создавать довольно жесткие условия нагружения. В установке, спроектированной для реализации этой схемы, пара трения состоит из вращающегося индентора из твердого сплава марки ВК8 и неподвижно закрепленного образца с покрытием. Нагрузка на пару трения составляла 20 Н. На всех образцах выполнялось 5 циклов изнашивания при различном пути трения. В качестве интегральной количественной характеристики износа использовали величину объемного износа.

Металлографические исследования структуры выполняли на оптических микроскопе марки *NIKON Eclipse MA100*. Шлифы готовили по стандартной технологии.

**Результаты исследований**

На рис. 1 показаны снимки типового варианта структуры покрытий (при разной степени увеличения) после дополнительного воздействия ВЭН ТВЧ, сформированный при удельной мощности нагрева $_{3,0}\cdot10^8$ Вт/м$^2$ и линейной скорости перемещения образца 0,13 м/с.




а б

Рисунок 1 – Структура плазменного покрытия после воздействия ВЭН ТВЧ

На снимке рис. 1, а отчетливо видно, что при дополнительном температурном воздействии в структуре плазменного покрытия по сравнению с исходным покрытием [11] происходят существенные изменения: практически ликвидируются поры (с 12% до 1% после оплавления) и нерасплавленные частицы порошка, отсутствуют участки с несплошностью на переходной границе. В отличие от исходной структуры после индукционного нагрева воздействия распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя становится практически равномерным, хотя ее уровень остается на значениях среднего исходного. Характерной особенностью полученной структуры является появление дендритных кристаллов, образование которых свидетельствует о наличии жидкой фазы. Кроме того, в структуре присутствует карбидная фаза (рис. 1, б), что обусловлено сложным химическим составом напыляемого порошка [12].

На рис. 2 приведена кинетика изнашивания плазменных покрытий при сравнительных испытаниях образцов.

Как следует из приведенных зависимостей на пути трения примерно до 7 км интенсивность изнашивания покрытий после индукционного воздействия практически одинакова с исходными покрытиями. И только на максимально принятых в условиях экспериментов пути трения их износостойкость несколько ниже.

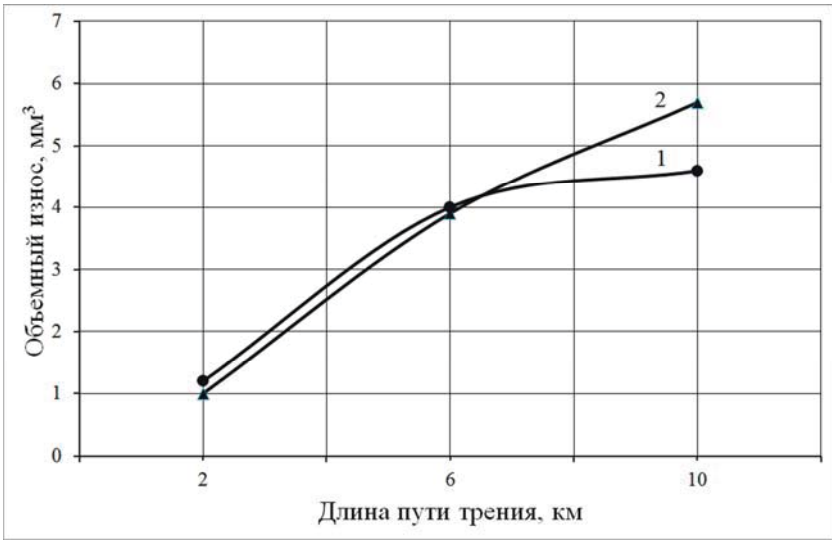



Рисунок 2 – Кинетика изнашивания образцов с покрытиями:
1 – исходный вариант; 2 – после воздействия ВЭН ТВЧ

**Выводы**

Таким образом, исследования плазменных покрытий после нагрева ТВЧ показали, что при повторном высокоэнергетическом воздействии в структуре покрытия практически ликвидируются поры и нерасплавленные частицы порошка, отсутствуют участки с неспошностью на переходной границе. При этом результаты испытаний на износостойкость в условиях трения скольжения продемонстрировали, что ожидаемого эффекта в плане ее повышения не наблюдается.

Следует особо отметить, что аналогичный результат будет получен и при любых других методах повторного высокоэнергетического воздействия на исходную структуру газотермических покрытий.

Однако есть и положительные моменты: отсутствие границы между покрытием и основой свидетельствует о фактическом их спекании, что наряду с равномерным распределением микротвердости по глубине слоя практически исключает возможность образования сколов, отслоений и других дефектов, присущих напыленным покрытиям, полученным по традиционным технологиям. Поэтому плазменные покрытия, сформированные при повторном высокоэнергетическом воздействии будут обладать более высоким уровнем надежности в процессе эксплуатации.

## Список литературы

1. *Чёсов Ю.С., Зверев Е.А.* Методика нанесения плазменных износостойких покрытий // Научный вестник НГТУ. 2014. № 2(55). С. 156-165.

2. *Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Плохов А.В.* Структура плазменных износостойких покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 // Обработка металлов. 2010. № 1(46). С. 14-18.

3. Методы повышения эксплуатационных свойств плазменных покрытий / Ю.С. Чёсов, П.В. Трегубчак, Е.А. Зверев, И.А. Ерохин // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: Материалы 10-й Всероссийской научно-практической конференции. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. С. 23-25.

4. Комбинированная технология формирования плазменных износостойких покрытий / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, П.В. Трегубчак, Н.В. Вахрушев // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): Материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Иркутск: Изд-во НИ ИрГТУ, 2013. С. 81-84.

5. *Skeeba V.Yu, Pushnin V.N., Erohin I.A., Kornev D.Yu.* Integration of production steps on a single equipment // Materials and Manufacturing Processes. 2015. (Article in Press). DOI: 10.1080/10426914.2014.973595

6. *Skeeba V., Ivancivsky V., Pushnin V. Numerical* Modeling of Steel Surface Hardening in the Process of High Energy Heating by High Frequency Currents // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 698. P. 288-293. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.288

7. Анализ напряженно-деформированного состояния материала при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов. 2014. № 3 (64). С. 90-102.

8. *Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Трегубчак П.В.* Технологическое обеспечение качества плазменных покрытий // Обработка металлов. Новосибирск. 2012. № 1(54). С. 10-13.

9. Структура износостойких плазменных покрытий после высокоэнергетического воздействия ТВЧ / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, В.В. Иванцивский, В.Ю. Скиба, Н.В. Плотникова, Д.В. Лобанов // Обработка металлов. 2014. № 4((65). С. 11-18.

10. *Чёсов Ю.С., Зверев Е.А.* Исследование износостойкости покрытий, нанесенных методом плазменного напыления // Научный вестник НГТУ. 2008. № 3(32). С. 175–181.

11. Исследование влияния токов высокой частоты на структуру плазменных покрытий / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, Н.В. Плотникова, П.В. Трегубчак, И.А. Ерохин // Инновации в машиностроении – основа технического развития России : материалы VI международной научно-технической конференции. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2014. С. 216-219.

12. *Чёсов Ю.С., Зверев Е.А.* Качество износостойких плазменных покрытий после индукционного нагрева / В мире научных открытий. Красноярск. 2015. № 2(62). С. 248-266.

## WEAR-RESISTANCE OF PLASMA-SPRAYED COATINGS AFTER INDUCTION HEATING

**Chesov Yu. S.** [1], Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: chesov@ngs.ru
**Zverev E. A.** [1], Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: egor_z@ngs.ru
**Skeeba V. Yu.** [1], Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru
**Plotnikova N. V.**[1], Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: plotnikova1975@mail.ru
**Tregubchak P. V.** [1], assistant, e-mail: ipv@mail.ru
**Zarubin D. Yu.** [1], student, e-mail: dmitryzarubin@mail.ru

[1] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

**Abstract:** Metallographic research results of the microstructure of wear-resistant plasma coatings from high-chromium powder material after influence by high-frequency currents are presented in this article. They demonstrated that pores, unmelted powder particles and discontinuities of the boundary layer substantially disappear in the coating structure. In contrast to the initial structure, the microhardness distribution on the layer depth becomes almost uniform, although its level remains at the average values of the initial. The actual sintering of the plasma-sprayed coating with the substrate is observed. The comparative wear-resistance tests under friction-sliding conditions of samples with initial structure and structure obtained after influence by induction heating were performed. It is shown, that the increasing of wear-resistance is not observed.

**Keywords:** wear-resistance; induction heating; quality; structure; plasma coatings.

**УДК 621.793.74**

# СПЕЦИФИКА СТРУКТУРЫ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ КЕРАМИКИ[1]

*Ю. С. ЧЁСОВ, канд. техн. наук, доцент,*
*Е. А. ЗВЕРЕВ, канд. техн. наук, доцент,*
*А. А. НИКУЛИНА, канд. техн. наук, доцент,*
*Н. В. ВАХРУШЕВ, аспирант,*
*А. С. ВАГАНОВ, инженер,*
*И. В. БАНДЮРОВ, магистрант,*
(*НГТУ, г. Новосибирск*)

Зверев Е.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: egor_z@ngs.ru

**Аннотация:** Рассмотрено одно из наиболее перспективных направлений повышения качества износостойких плазменных покрытий за счет применения многокомпонентных механических смесей из различных порошковых материалов. Приведены типовые структуры плазменных покрытий из механических никель- и кобальтокерамической смесей и растровый снимок одного из вариантов исходной порошковой смеси. Результаты исследования показали, что в покрытии наблюдаются взаимное обволакивание частиц порошковой смеси, а также низкая пористость. Однако в покрытии процентное содержание керамики заметно меньше, чем в исходной смеси, что объясняется эффектом сегрегации компонентов при плазменном напылении покрытия.

**Ключевые слова:** качество, плазменные покрытия, структура, механическая смесь, керамика

**Введение**

В современной технологии машиностроения для обеспечения требуемого уровня износостойкости деталей машин широко используются плазменные покрытия, нанесенные из стандартных порошковых материалов. Несмотря на ряд достоинств данной технологии, ей присущи и недостатки, обусловленных нестабильностью показателей качества напыленного слоя: степень расплавленности порошкового материала, количество и размер пор, а также характер границы между покрытием и основой [1]. Поэтому с целью повышения качества плазменных покрытий одним из наиболее перспективных направлений развития технологий плазменного нанесения покрытий является формирование покрытий из многокомпонентных порошковых материалов.

Одним из существенных достоинств использования механических смесей (смеси порошков с различным химическим составом) является возможность управления структурой, а, следовательно, и уровнем физико-механических свойств [2].

Среди многообразия композиционных материалов: механические смеси различных металлов, плакированные, конгломерированные и другие порошковые материалы следует отдать предпочтение порошкам первой группы. Это объясняется тем, что применение порошков в виде механических смесей является процессом технологически гораздо менее трудоемким, более дешевым и производительным. На данный момент в технической литературе приведены лишь общие рекомендуемые варианты возможных комбинаций исходных марок порошков, из которых образуются многокомпонентные механические смеси [3, 4]. Однако какие-либо практические сведения о методике нанесения покрытий и полученных результатах полностью отсутствуют.

Нами был проведен комплекс предварительных исследований по формированию подобных композиций. Основным компонентом служила оксидная керамика марки М28. В качестве связующих компонентов были использованы порошковые материалы на основе никеля марки ПГ-12Н-01 и кобальтовый порошок марки ПГН-В3К с различным процентным содержанием.

Сравнительные испытания на износостойкость показали, что их можно использовать в качестве упрочняющих покрытий, которые могут воспринимать значительные нагрузки [5].

Целью настоящих исследований является изучение специфики структуры износостойких плазменных покрытий, сформированных на базе никель- и кобальтокерамической порошковых смесей.

[1]Работа выполнена при финансовой поддержке проекта, выполняемого в рамках гранта РФФИ в 2015г. и в плановом периоде в 2013-2015 гг. (Номер проекта 13-08-01102 А "Проектно-исследовательская разработка технологической установки для плазменно-механической обработки

**Методика проведения экспериментов**

Нанесение плазменных покрытий на образцы производили на установке "Киев-7" плазмотроном ПУН-8 мощностью 40 кВт.

В качестве образцов применялись втулки, изготовленные из стали 20 с наружным и внутренним диаметрами соответственно 25 мм и 15 мм, длиной 12 мм. Процесс напыления осуществляли за счет поступательного перемещения плазмотрона и вращения оправки с образцами. Заготовки предварительно подвергались процессу струйно-абразивной очистки частицами из электрокорунда. Образцы обрабатывались при одинаковых условиях, что позволило получить поверхности заготовок с шероховатостью порядка Rz = 60…80 мкм. Режим напыления был принят следующим: величина тока дуги плазмотрона – 180 А; напряжение – 160 В; расход плазмообразующего газа (воздуха) – 0,9 л/мин; дистанция напыления – 110 мм; скорость перемещения плазмотрона – 250 мм/мин; частота вращения оправки – 150 мин$^{-1}$. Толщина слоя покрытия выдерживалась в пределах 450…500 мкм.

Механические смеси представляли собой два варианта композиций: порошки марок М28 (80 %) и ПГ-12Н-01 (20 %) – никелькерамическая смесь; М28 (80 %) и ПГН-В3К (20 %) – кобальтокерамическая смесь. Приготовление механических смесей из порошков разных металлов является одной из важнейших операций технологического процесса нанесения плазменных износостойких покрытий. Ее назначение – обеспечение однородности смеси. На практике данная операция реализуется путем механического перемешивания в специальных мельницах.

Металлографические исследования структуры выполняли на оптическом и растровом электронном микроскопах моделей соответственно *NIKON Eclipse MA*100 и *EVO 50 XVP Carl Zeiss*. Шлифы готовили по стандартной технологии, основанной на механическом шлифовании и полировании образцов.

**Результаты исследований**

На рис. 1 изображен снимок исходной никелькерамической порошковой смеси, полученной при помощи растрового микроскопа.

Из рисунка видно, что частицы никелевого порошка имеют форму, близкую к сферической и обладают большим фракционным размером. Частицы оксидной керамики близки к остроугранной форме. Аналогичное соотношение размеров частиц присуща и кобальтокерамической смеси.

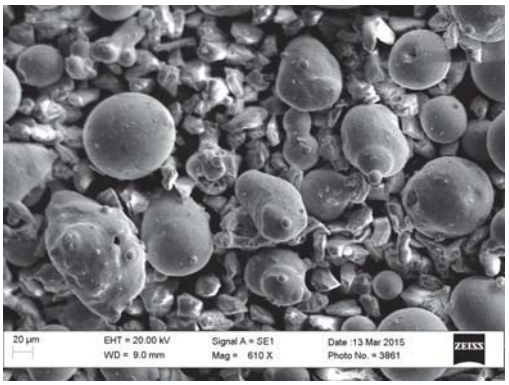
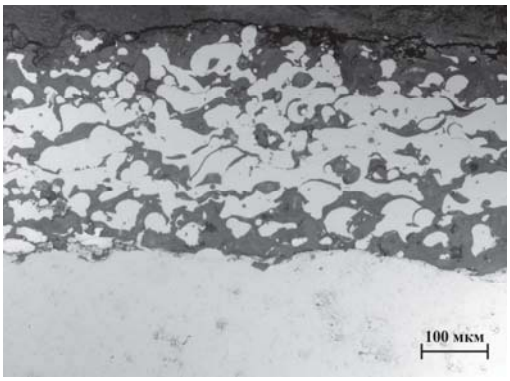
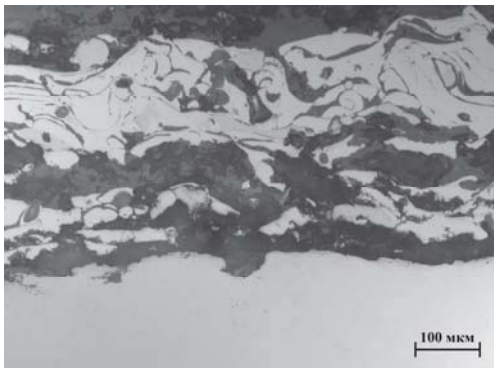



Рисунок 1 – Частицы исходной смеси

Структуры покрытий для исследуемых вариантов механических смесей изображены на рис. 2.




а




б

Рисунок 2 – Структуры плазменных покрытий из механических смесей:
а – никелькерамическая; б - кобальтокерамическая

Анализируя полученные изображения структуры многокомпонентных покрытий, следует отметить, что закономерности их формирования по своей природе аналогичны механизму формирования однокомпонентных плазменных покрытий. Покрытие образуется путем наслоения расплавленных частиц порошков, деформирующихся при соударении с основой или деформированными ранее частицами. На фотографии отчетливо просматривается переходная граница между покрытием и основой.

Кроме того, на снимках ярко выражены границы между отдельными компонентами смесей. Светлые частицы являются составляющими никелевого и кобальтового порошков, серые частицы – оксидная керамика. В целом наблюдается взаимное обволакивание частиц порошков и низкая пористость. Причем никелькерамической смеси присуще равномерное распределение порошков, а в кобальтокерамической композиции эта закономерность не просматривается. Можно также отметить, что в многокомпонентных покрытиях процентное содержание керамики заметно меньше, чем в исходной смеси, что объясняется эффектом сегрегации компонентов при плазменном напылении покрытия.

**Выводы**

Использование многокомпонентных порошковых материалов является весьма перспективным направлением с целью получения покрытий с более высоким уровнем качества слоя, поскольку они наследуют достоинства каждого из исходных порошков. Однако их промышленное использование потребует проведения целого комплекса технологических, металлографических и иных исследований, в том числе с поиском наиболее рационального процентного соотношения механической смеси.

## Список литературы

1. *Чёсов Ю.С., Зверев Е.А.* Методика нанесения плазменных износостойких покрытий // Научный вестник НГТУ, 2014. № 2(55). С. 156-165.

2. Структура износостойких плазменных покрытий из никель-керамической смеси / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, Н.В. Плотникова, А.С. Ваганов, Н.В. Вахрушев, И.В. Бандюров // Актуальные проблемы в машиностроении. – Новосибирск. 2015. № 2. С. 405-409.

3. *Пузряков А. Ф.* Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2008. 357 с.

4. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Аруатовская. Киев : Наукова думка. 1987. 544 с.

5. Сравнительные испытания износостойких плазменных покрытий, сформированных на базе механических смесей из различных порошковых материалов / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, Н.В. Вахрушев, А.С. Ваганов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России : материалы VI международной научно-технической конференции (23-26 сентября 2014 года). Барнаул: Изд-во АлтГТУ 2014. С. 211-215.

## STRUCTURAL SPECIFICITY OF WEAR-RESISTANT PLASMA COATINGS OF MECHANICAL MIXTURES BASED ON CERAMIC

**Chesov Yu. S.** [1], Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: chesov@ngs.ru
**Zverev E. A.** [1], Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: egor_z@ngs.ru
**Nikulina A. A.**[1], Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: a.nikulina@corp.nstu.ru
**Vakhrushev N. V.** [1], Ph.D. student, e-mail: vah_nikit@mail.ru
**Vaganov A. S.** [1], engineer, e-mail: 20vaganov10@mail.ru
**Bandyurov I. V.** [1], student, e-mail: bandyurov@yandex.ru

[1] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

**Abstract:** One of the most promising ways for improving the quality of wear-resistant plasma coatings through the application of multi-component mechanical mixtures of different powder materials has been considered. The typical plasma coating structures of mechanical nickel- and cobalt-ceramic mixtures and a raster scan of one variant of the initial powder mixture are shown. Research results have shown that the mutual enveloping of the powder mixture particles and low porosity are observed in the coating. However, the percentage content of the ceramic in the coating is noticeably less than in the initial mixture due to the effect of component segregation during plasma spraying of coating.

**Keywords:** quality; plasma coatings; structure; mechanical mixture; ceramic.

**УДК 539.375:621.77**

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СТУПЕНЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ

*А. А. АБРАМОВ, научный сотрудник*
*(ФТИ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь)*

220141, г. Минск, ул. Купревича, 10,
Государственное научное учреждение "Физико-технический институт НАН Беларуси",
e-mail: email@andrewabramov.ru

**Аннотация**: В статье рассмотрены вопросы компьютерного моделирования процесса плоской поперечно-клиновой прокатки, в частности с помощью компьютерных моделей исследовано влияние геометрии инструмента и параметров процесса на напряженно-деформированное состояние, конечную температуру изделия и усилия прокатки. Приведены результаты верификации компьютерных моделей с аналитическими и экспериментальными данными.

**Ключевые слова**: осесимметричные ступенчатые детали, поперечно-клиновая прокатка, компьютерное моделирование, МКЭ, LS-DYNA.

**Введение**

Плоская поперечно-клиновая прокатка (ПКП) – способ обработки металлов и металлических сплавов давлением, состоящий в пластическом формообразовании заготовки вследствие ее вращательного перемещения вдоль плоских клиновых профильных инструментов, которые движутся параллельно друг относительно друга [1, 2]. В процессе формообразования металл перераспределяется от места внедрения клина к торцу и приобретает негативный профиль инструмента, формируя прокатанную деталь (рисунок 1).

Рисунок 1 – Прокатный инструмент с заготовкой

В последнее время новым направлением в развитии ПКП стало использование компьютерного моделирования при исследовании данного процесса. Так можно провести различные виртуальные эксперименты, которые позволяют определить характеристики напряженно-деформированного состояния, выявить наиболее проблемные зоны заготовки и внести изменения в геометрию инструмента и технологический процесс еще на стадии разработки.

**Моделирование процесса поперечно-клиновой прокатки**

В основе компьютерного моделирования ПКП лежит метод конечных элементов (МКЭ). Данный метод получил широкое распространение при моделировании различных процессов формообразования (штамповки, выдавливания, отливки, ковки), однако его использование при решении задач ПКП является относительно новым [3].

С помощью данного метода и программы LS-DYNA были проведены исследования процесса прокатки, основная их цель – получение зависимости характера протекания процесса формообразования заготовки от различных параметров инструмента и технологических параметров, а также определение условий устойчивого протекания процесса ПКП [4]. Ниже приведены наиболее важные моменты, которые учитывались при моделировании ПКП.

При компьютерном моделировании высокотемпературных процессов обработки металлов давлением, к которым относится прокатка, достаточно важным является правильное задание модели материала для заготовки. Это связано с тем, что данные процессы вызывают большие пластические деформации (50% и больше) и смещения с малыми упругими деформациями. В связи с этим требуются специальные модели материала, учитывающие это.

Программа LS-DYNA содержит большое количество различных моделей материала, от их выбора во многом зависит адекватность результатов моделирования. Предварительные исследования ПКП показали, что более точные результаты можно получить, используя модель упруговязкопластичного материала с учетом тепловых эффектов *Elastic Viscoplastic Thermal*. Кроме того, данная модель позволяет учитывать скорость деформации, что немаловажно, т.к. процесс формообразования зависит от скорости инструмента.

Поскольку деформацией клиновых инструментов можно пренебречь (поверхность обработана до высокой твердости), то они считались абсолютно твердыми, в связи с этим КЭ сетка была создана не во всем объем инструмента, а только на поверхности, непосредственно контактирующей с заготовкой, а в качестве модели материала была принята модель *Rigid*.

Помимо модели материала при моделировании процесса прокатки необходимо учитывать температурные эффекты. Это связано с тем, что тепловое состояние заготовки при ПКП, как и напряженно-деформированное состояние, сильно влияет на процесс формообразования.

Теплопередача при прокатке является достаточно сложной термодинамической задачей. Во время деформации заготовки ее поверхность обменивается теплотой с окружающей средой через конвекцию и излучение, а также контактирует с поверхностью инструмента и передает ей теплоту. Часть энергии пластического формоизменения при обработке детали преобразуется в энергию теплоты, что способствует нагреву заготовки в процессе прокатки.

Особенность моделирования процесса ПКП в термомеханической постановке заключается не только в задании температурных параметров и зависимости свойств материала заготовки от температуры, но и в использовании специальных контактных алгоритмов, учитывающих перераспределение температуры в контактных областях (заготовка – инструмент, воздух – заготовка, воздух – инструмент), а также в специальных методах решения связанных температурных и механических задач.

Для моделирования процесса прокатки в термомеханической постановке во входных данных для программы LS-DYNA были заданы параметры:

– температура: начальную температуру заготовки, верхнего и нижнего инструмента. Данные параметры задавались через карту *Initial Temperature Set*;

– конвективный теплообмен: для моделирования конвективного теплообмена использовалась карта *Boundary Convection Set*, значение коэффициента конвективной теплоотдачи для заготовки принималось равным $h_{cond}$ = 20 Вт/(м$^2\cdot$°С), температура окружающей среды $T_\infty$=20 °С;

– температурное взаимодействие на контакте заготовка – инструмент: учет температурного взаимодействия осуществлялся через карту контакта *Contact Forming Surface To Surface Thermal*. Для этого задавалась удельная теплопроводность между скользящими поверхностями $h_{cond}$ = 11 000 Вт/(м$^2\cdot$°С).

Данный тип контакта хорошо подходит для расчета контактных задач, в которых одно из соприкасающихся тел является абсолютно твердым. Для снижения осцилляций в контакте, обусловленных дискретностью соприкасающихся поверхностей, было введено демпфирование равное 20%.

Трение между заготовкой и инструментом задавалось с помощью коэффициентов статического *FS* и динамического *FD* трения и коэффициента экспоненциального затухания *DC* с учетом скорости поверхностей контакта. Трение влияет в основном на стабильность процесса прокатки, при слишком маленьком трении происходит проскальзывание заготовки. Поэтому при проведении расчетов, параметры *FS*, *FD* и *DC* были выбраны так, чтобы коэффициент трения на всей контактной поверхности составлял не менее 0.3.

При решении задачи использовался явный (*explicit*) метод реализованный в LS-DYNA. Существенным недостатком данного метода является его условная устойчивость, т.е. решение задачи не зависит от шага по времени, если он меньше определенного значения, которое определяется из критерия Куранта. Пакет LS-DYNA сам определяет размер шага решения, так, чтобы критерий Куранта не нарушался. Однако величина шага в этом случае оказывается очень маленькой, а расчет задачи занимает много времени.

Для того чтобы можно было за приемлемое время получить адекватные результаты, использовалось ручное задание шага решения. Для этого в карте *Control Timestep* задавался параметр пересчета массы элементов (*ISDO*) с положительным значением размера шага решения. Величина шага подбиралась для каждого конкретного случая исходя из размера сетки заготовки, скорости деформации, точности решения задачи и т.д.

**Результаты и обсуждение**

Как было сказано выше тепловое состояние заготовки существенно влияет на процесс прокатки. Теоретическое решение подобной задачи является достаточно сложным не только из-за особенностей теплопередачи при формообразовании, но и из-за того, что заготовка постоянно изменяет форму и поверхность контакта. Таким образом, компьютерное моделирование позволяет

изучить влияние температуры на прокатку без проведения сложных экспериментов и аналитических расчетов.

В процессе прокатки внутренний температурный градиент в заготовке может быть иногда достаточно большим, это вызвано теплообменом с внешней окружающей средой, теплоотдачей вследствие конвекции, процессом теплопереноса при контакте с инструментом и неравномерными внутренними источниками теплоты, связанными с неравной деформацией обрабатываемой детали. На рисунке 2 показано поле распределения температур в заготовке с начальной температурой нагрева 727 °С.

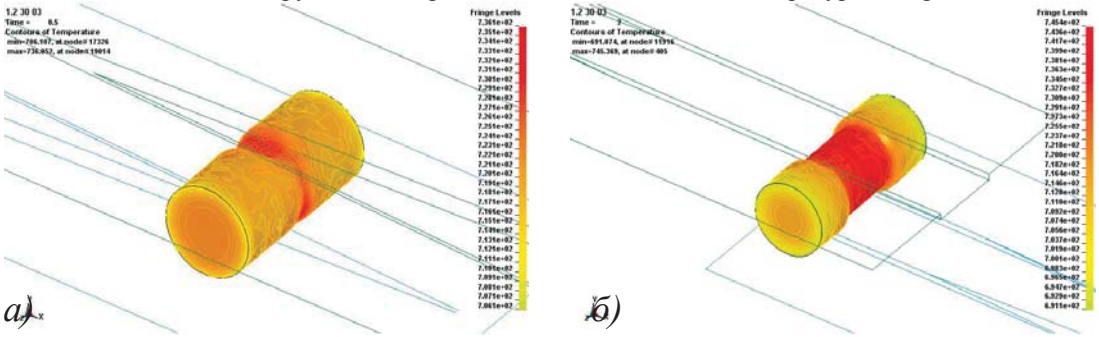



Рисунок 2 – Распределение температуры в заготовке: *а)* t=0,5 с; *б)* t=2 с

В момент времени t=0,5 с градиент температур составлял ΔT=30°C, в момент времени t=2 с – ΔT=54 °C. Как видно из рисунка, температура деформированной зоны выше, чем недеформированной, а температура точек, контактирующих с инструментом ниже, чем у тех, что находятся вне контакта. Это связано с неравномерным генерированием тепла в очаге деформации, излучением тепла в окружающую среду и передачей тепла инструменту за счет непосредственного контакта.

Начальная температура заготовки также оказывает влияние на ее напряженно-деформированное состояние. Эксперименты показали, что чем выше начальная температура, тем ниже пластические деформации.

Геометрия инструмента также оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние заготовки и на характер прокатки.

Так угол заострения $\beta$, образованный деформирующей наклонной гранью инструмента с направлением его движения, определяет скорость распространения очага деформации вдоль оси заготовки, длину инструмента, максимально степень обжатия за проход. При постоянной длине инструмента $\beta$ определяет ширину контактной области заготовки с инструментом (рисунок 3).

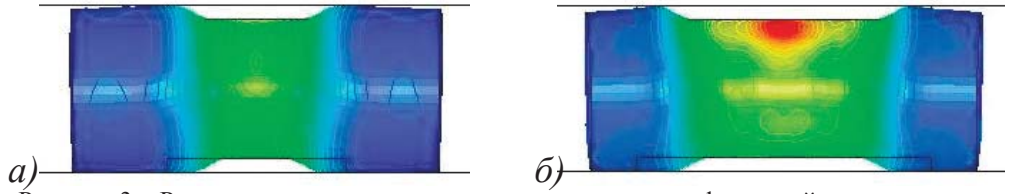



Рисунок 3 – Распределение эквивалентных пластических деформаций при различных углах заострения в момент времени t=1,2 с: *а)* $\beta=3^0$; *б)* $\beta=5^0$

На рисунке показаны распределения эквивалентных пластических деформаций при углах заострения $3^0$ и $5^0$ в момент времени t=1,2 с. Как видно из рисунка, чем больше $\beta$, тем шире область контакта и больше деформации.

Виртуальные эксперименты показали, что с увеличением угла заострения растут эквивалентные пластические деформации и температура заготовки. Это связано с тем, что чем больше угол заострения, тем больше скорость распространения очага деформации, а значит, тем больше энергия деформации и температура заготовки, которая зависит от нее.

Также были проведены исследования влияния угла наклона боковой грани $\alpha$ и степени обжатия $\delta$ на процесс формообразования. Результаты показали хорошую сходимость с реальными экспериментами и теорией [5, 6].

Важным моментом при проектировании инструмента и прокатных станов является расчет усилий прокатки. Это имеет очень важное значение, так как усилия и соотношения между ними определяют возможность осуществления процесса прокатки.

Так усилие прокатки $F_x$ с учетом потерь на преодоление силы трения определяет мощность привода стана. Осевое растягивающее усилие $F_y$ определяет величину растягивающих напряжений, возникающих в прокатываемой заготовке. Значения величины $F_z$ необходимы при выборе

стана для ПКП (жесткость стана должна быть такой, чтобы величина упругих деформаций станины стана, возникающих в процессе прокатки, были значительно меньше величины допусков прокатываемых изделий).

В работе [7, 8] экспериментально получены значения усилий при различных параметрах процесса. Ниже в таблице приведено сравнение экспериментальных данных и теоретических результатов с результатами численного моделирования, также приводится оценка отклонения величины значений $F_x$ и $F_z$ от экспериментальных данных.

| Температура | Геометрия клина | Экспериментальные данные | | Результаты аналитических расчетов | | Результаты моделирования | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $F_x$, (Н) | $F_z$, (Н) | $F_x$, (Н) | $F_z$, (Н) | $F_x$, Н | $F_z$, (Н) |
| 727 °С | δ=1,2; β =3$^0$ α=30$^0$ | 3680,0 | 16400,0 | 3629,00 | 16382,0 | 3496,0 | 16083,0 |
| | | - | - | 1,39% | 0,11% | 5,00% | 1,93% |
| | δ=1,2; β =5$^0$ α=30$^0$ | 4720,0 | 20200,0 | 4896,00 | 20286,0 | 4752,0 | 21834,0 |
| | | - | - | 3,73% | 0,43% | 0,68% | 8,09% |
| | δ=1,2; β =7$^0$ α=30$^0$ | 9040,0 | 23000,0 | 6009,00 | 22982,0 | 5824,0 | 25079,0 |
| | | - | - | 33,53% | 0,08% | 35,58% | 9,04% |
| | δ=1,6; β =3$^0$ α=30$^0$ | 5520,0 | 19200,0 | 3781,00 | 18637,0 | 4277,0 | 18718,0 |
| | | - | - | 31,50% | 2,93% | 22,52% | 2,51% |
| | δ=1,6; β =5$^0$ α=30$^0$ | 8400,0 | 22240,0 | 5067,00 | 23370,0 | 5734,0 | 21709,0 |
| | | - | - | 39,68% | 5,08% | 31,74% | 2,39% |
| | δ=1,6; β =7$^0$ α=30$^0$ | 10880,0 | 26600,0 | 6198,00 | 26838,0 | 6870,0 | 25585,0 |
| | | - | - | 43,03% | 0,89% | 36,86% | 3,82% |

**Выводы**

При исследовании процесса ПКП методом конечных элементов были получены результаты, которые вполне соответствуют результатам теоретических исследований и экспериментальным данным [9].

На это указывают как характер поведения заготовки в процессе прокатки, так и ряд закономерностей, полученных при проведении нескольких виртуальных экспериментов: компьютерная модель достаточно точно определяет геометрию прокатываемого образца и кинематические параметры процесса, модель удовлетворяет условию пластичности, условию несжимаемости, компьютерная модель достаточно точно определяет геометрию площадки контакта образца и напряжения в очаге деформации.

В тоже время модель по отношению к точным теоретическим решениям и экспериментальным результатам: дает погрешность в определении напряжений на контакте до 20%, дает ошибку в определении кинематики течения материала, при обжатиях меньше 1,02 поле напряжений в пластической области не отражает местный характер поля.

Результаты исследований показали, что численное моделирование позволяет дать с определенной точностью представление о характере протекающих процессов в заготовке, выявить общие закономерности прокатки, а также получить численные данные, характеризующие некоторые физические величины. Эти данные можно использовать при проектировании инструмента.

## Список литературы

1. *Кожевникова, Г.В.* Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 291 с.

2. *Щукин, В.Я.* Основы поперечно-клиновой прокатки / В.Я. Щукин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 223 с.

3. *Абрамов, А.А.* Использование пакета LS-DYNA для компьютерного моделирования процесса поперечно-клиновой прокатки / А.А. Абрамов, Г.В. Кожевникова // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2011. № 2. с.

4. *Абрамов, А.А.* Конечно-элементный анализ процесса поперечно-клиновой прокатки в системе LS-DYNA / А. Абрамов, Г. Кожевникова // Сб. научных трудов “Информационные технологии программы Союзного государства “ТРИАДА”, Минск, Беларусь, 2010, с.111–125.

5. *Çakırcalı, M.* Cross wedge rolling of a Ti6Al4V (ELI) alloy: the experimental studies and the finite element simulation of the deformation and failure / M. Çakırcalı, C. Kılıçaslan, M. Güden, E. Kıranlı, V.Y. Shchukin, V.V. Petronko // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 65, Issue 9-12. – pp 1273–1287.

6. *Shchukin, V.Y.* Cross-wedge rolling at PTI NAS Belarus / V.Y. Shchukin, G.V. Kozhevnikova, V.V. Petrenko // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 201–202. – P. 1198–1202.

7. *Клушин, В.* Опыт внедрения нового метода изготовления валов / В.А. Клушин, Е.М. Макушок, В.Я. Щукин. – Минск: БелНИИНТИ, 1977. – 49 с.

8. *Кожевникова, Г.В.* Построение эпюр контактных напряжений на границе инструмент–заготовка при поперечной прокатке / Г.В. Кожевникова // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 1. – С. 94–99.

9. *Kozhevnikova, G.* Cross-wedge rolling / G. Kozhevnikova. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2012. – 321 c.

## COMPUTER SIMULATION OF FORMING OF AXISYMMETRIC MULTIDIAMETER PARTS BY CROSS-WEDGE ROLLING METHOD

**Abramov A. A.,** Research associate, e-mail: email@andrewabramov.ru

The State scientific organization "Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus“, 10, Kuprevicha str., Minsk, 220141, Belarus

**Abstract:**The questions of computer simulation of flat cross-wedge rolling (CWR) are discussed in the paper, in particular using computer models for studying how tool geometry and process parameters effect on the stress-strain state, the final temperature of the product and the rolling forces. The verification results of the computer models with analytical and experimental data are presented.

**Keywords:** axisymmetric multidiameter parts, cross-wedge rolling, computer simulation, FEM, LS-DYNA**.**

**УДК 621.793**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТЖИГА НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫМ ПЛАКИРОВАНИЕМ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

*А. Н. БЕЛЫЙ, магистр техн. наук.*
*К. Е. БЕЛЯВИН, доктор техн. наук, профессор,*
*М. А. ЛЕВАНЦЕВИЧ, кандидат технических наук,*
*(Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь.)*

Белый А.Н. – 220013 , г. Минск, пр-т Независимости, 65,
Белорусский национальный технический университет,
e-mail: belyy_alex@mail.ru

**Аннотация:** Приведены результаты оценки адгезионной прочности покрытий из бронзы (БрО10Ф1), сформированных методом деформационного плакирования гибким инструментом. Испытаниям при нормальном отрыве подвергались образцы с покрытиями до и после отжига в среде эндогаза при температуре в камере печи 800…820 $^0$С. Установлено, что адгезионная прочность при отрыве образцов с покрытием, без предварительного отжига, находится в пределах 11,5…13,5 МПа. При этом разрушение слоя покрытия имеет смешенный, адгезионно-когезионный характер. После отжига – адгезионная прочность существенно возрастает и превышает технологические возможности используемого клея, имеющего прочность на отрыв 22,5…25,0 МПа. Разрушение слоя покрытия в этом случае не наблюдалось. Также рассмотрены возможности применения покрытий из Ni и Cr, в качестве подслоя для последующего формирования покрытия из БрО10Ф1.

**Ключевые слова:** покрытие, деформационное плакирование, гибкий инструмент, вращающаяся металлическая щетка, отжиг, нормальный отрыв, адгезионная прочность

**Введение**

Деформационное плакирование гибким инструментом (ДПГИ), обеспечивающее формирование поверхностного слоя с заданным комплексом эксплуатационных характеристик, относится к новым перспективным технологиям финишной обработки, получившим широкое развитие в настоящее время [1–6]. Метод ДПГИ сочетает пластическое деформирование поверхностного слоя основы с одновременным формированием покрытия, которое может рассматриваться как самостоятельный функциональный слой, так и в качестве промежуточного слоя необходимого для увеличения адгезионной прочности при формировании биметаллического соединения, с применением технологий порошковой металлургии и прокатки [7–10].

Однако в вопросе оценки прочности сцепления сформированных покрытий с основой многие исследователи приводят лишь данные о качественной оценке адгезионных свойств покрытий, что в определенной степени затрудняет не только выбор рациональных технологических режимов, но и расчет энергосиловых параметров процесса плакирования.

Необходимо отметить, что ранее выполненными исследованиями нами было установлено, что адгезионная прочность и характер разрушения покрытий, сформированных методом ДПГИ, в значительной степени зависит от вида материала основы и состава материала донора, а также, возможно, и толщины сформированного слоя. Максимальную адгезионную прочность (15,1 МПа) и адгезионный характер разрушения имели покрытия из бронзы БрО5С5Ц5Гр1ДМ0,5 с толщиной слоя 3…5 мкм, сформированные на образцах из стали 45. Меньшие значения адгезионной прочности (13,2 МПа) и смешанный характер разрушения имели покрытия, сформированные из бронзы БрОС [11]. Однако вопросы влияния термической обработки на адгезионную прочность покрытий полученных методом ДПГИ не изучались. Между тем, подобная информация способствовала бы значительному расширению технологических возможностей метода ДПГИ и выбору материала покрытия, предназначенного для эксплуатации в конкретных условиях.

**Цель работы** заключалась в изучении влияния термической обработки (отжига) на адгезионную прочность покрытий из бронзы БрО10Ф1, сформированных методом деформационного плакирования гибким инструментом.

**Методика исследований** предполагала проведение испытаний на нормальный отрыв двух склеенных образцов цилиндрической формы, в соответствии с ГОСТ 27890–88. Перед началом испытаний на рабочих торцовых поверхностях (Ra = 0,16 мкм) цилиндров, изготовленных из ст. 20 (HRC 20) формировали слой покрытия из бронзы БрО10Ф1. При этом формирование слоя покрытия осуществлялось как на чистых поверхностях, так и на поверхностях с предварительно нанесенным слоем из Ni и Cr (таблица 1).

Таблица 1 – Испытываемые образцы

| № образца | Материал основы | Материал покрытия |
|---|---|---|
| 1 | Сталь 20 | БрО10Ф1, с последующим отжигом |
| 2 | Сталь 20 | БрО10Ф1 |
| 3 | Сталь 20 | БрО10Ф1, подслой Ni, с последующим отжигом |
| 4 | Сталь 20 | БрО10Ф1, подслой Ni |
| 5 | Сталь 20 | БрО10Ф1, подслой Cr, с последующим отжигом |

Формирование покрытий осуществляли с использованием вращающейся цилиндрической щетки диаметром 150 мм, шириной 15 мм, длиной и диаметром ворса 25 и 0,25 мм соответственно. Линейная скорость вращения щетки составляла 35…38 м/с, частота вращения образца – 60 мин$^{-1}$, число проходов щетки – 9…12. Толщина слоя покрытия из бронзы БрО10Ф1 на чистых поверхностях составляла 9…12 мкм, толщина покрытий из Ni и Cr – 3…4 мкм, суммарная толщина двухслойных покрытий Ni+БрО10Ф1 и Cr+БрО10Ф1 не превышала 10…12 мкм. Площадь основания цилиндрических образцов, на которую наносили испытываемое покрытие, составляла 1193,9 мм$^2$.

После нанесения покрытия образцы подвергались отжигу в защитно-восстановительной атмосфере эндогаза при температуре 800–820 ºС в течение 30 – 35 мин (остывание с печью). Затем производилась мойка и сушка образцов, обезжиривание и их склеивание с образцами без покрытия при усилии сжатия 3000 Н. Для склеивания использовался клей марки 3М производства Республики Корея. Время выдержки склеенных образцов составляло 24 часа.

Оценку адгезионной прочности склеенных образцов производили на универсальной гидравлическую испытательную машину Instron Satec 300LX. Технические характеристики модели 300LX: предельная нагрузка – 300 кН; максимальная скорость – 152 мм/мин; точность измерения нагрузки – 0,5% от измеренного значения; частота синхронной регистрации данных – 1кГц; полное программное управление.

Испытания проводили с постепенным нарастанием нагрузки до разрыва пары образцов. Скорость перемещения захвата разрывной машины не превышала 10 мм/мин. Фиксировали нагрузку, при которой произошло разрушение образца, после чего обе части испытанного образца подвергали визуальному осмотру для определения характера разрушения:

1) адгезионный (А) – отрыв покрытия от основания;

2) когезионный (К) – разрушение внутри слоя покрытия;

3) межслойный (М) – разрушение между слоями покрытия;

4) смешанный (А, К, М) – сочетание перечисленных выше разрушений.

Предел прочности покрытия при отрыве образца (σ) в паскалях вычисляли по формуле

$$\sigma = \frac{P}{F},$$

где P – сила отрыва образца, Н; F – площадь основания, м$^2$.

Результаты проведенных испытаний показали, что термическая обработка покрытий из бронзы БрО10Ф1 оказывает существенное влияние на их адгезионную прочность. У всех образцов с покрытием подвергнутых отжигу она превысила адгезионную прочность используемого клея, составляющую 22,5…25,0 МПа. В то же время у образцов, не подвергавшихся отжигу, адгезионная прочность составила в среднем 11,5…13,5 МПа. При этом, преобладал преимущественно когезионный характер разрушения покрытия (рисунок 1 *а*).

Следует отметить, что наряду с изменением адгезионной прочности изменяется и микротвердость поверхности сформированных покрытий. У образцов до отжига и после отжига среднее значение микротвердости покрытий $HV_{0,2}$ составляет, соответственно 315 и 187.

*а)*

*б)*

Рисунок 1 – Фото поверхностей образцов после испытаний на разрывной машине
*а)* – покрытие БрО10Ф1 без отжига, *б)*– покрытие БрО10Ф1, с последующим отжигом

**Выводы**

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют заключить, что на адгезионную прочность и характер разрушения покрытий, сформированных методом деформационного плакирования гибким инструментом, существенное влияние оказывает последующая термическая обработка. Отжиг подобных покрытий способствует повышению их адгезионной прочнсти свыше 25 МПа и снижению микротвердости поверхности в 1,8…2,0 раза.

Адгезионная прочность покрытий из бронзы БрО10Ф1 сформированных как непосредственно на поверхности чистых стальных образов, так и на поверхности образцов с предварительно нанесенным слоем Ni или Cr, без термической обработки имеют прочность сцепления в пределах 11,5…13,5 МПа.

Результаты выполненных исследований имеют важное значение для дальнейших исследований, направленных на расширение технологических возможностей технологии деформационного плакирования гибким инструментом путем формирования функционально ориентированных покрытий, а также покрытий применяемых в качестве подслоя в процессах порошковой металлургии.

## Список литературы

1. Улучшение служебных характеристик и качества металлических изделий способом фрикционного плакирования / Л. С. Белевский [и др.] // Сталь. – 2011. – № 2. – С. 93–96.

2. *Анцупов, В. П.* Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом / В.П. Анцупов. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 1999. – 241 с.

3. Фрикционное плакирование металлом по металлу. Ч. 1. Термопластическая деформация и процессы взаимодействия плакируемой поверхности и плакирующего слоя / Л.С. Белевский [и др.] // Металлург. – 2006. – № 10. – С. 33–38.

4. Фрикционное плакирование металлом по металлу. Ч. 2. Механизм фрикционного плакирования / Л.С. Белевский [и др.] // Металлург. – 2006. – № 11. – С. 36–38.

5. *Завалищин А.Н.* Поведение при нагреве алюминиевых покрытий, полученных во фрик-

ционном контакте, // Металловедение и термическая обработка металлов. 2001. № 7. С. 23 – 26.

6. *Завалищин А.Н., Завалищина Е.Г., Белевский Л.С.* Термическая обработка алюминиевого покрытия, нанесенного металлическими щетками // Известия вузов. Черная металлургия. 1989. № 7. С. 110-112.

7. *Белявин К.Е.* К вопросу о получении композиционного двухслойного антифрикционного материала / К.Е. Белявин, А.Н. Белый, Л.Н. Дьячкова, М.А. Леванцевич // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. – Мн. – 2014. – С.38 – 44.

8. Моделирование процесса электроимпульсного спекания металлических порошков / К.Е. Белявин, Д.М. Минько, О.О. Кузнечик/ Инженерно-физический журнал. – 2004. – Т. 77, №3. – С. 136–143.

9. Solid-state laser fusion of spherical titanium powders / K.E. Belyavin, D.V. Minko, O.O. Kuznechik et all. / Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Springer New York. – 2008. – Vol. 47, No. 7-8. – pp. 500–505.

10. *Щукин, В.Я.* Новое в поперечно-клиновой прокатке / В.Я. Щукин, Г.В. Кожевникова, А.О. Рудович // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 3. – С. 35–37.

11. *Леванцевич, М.А.* Исследование адгезионной прочности покрытий, сформированных методом деформационного плакирования гибким инструментом / М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, Е.Ф. Коновалова // Актуальные вопросы машиноведения : сб. научн. трудов. / ОИМ НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – 2014. Вып. 3. – С. 350–353.

## INVESTIGATING THE ANNEALING INFLUENCE ON ADHESIVE STRENGTH FOR THE COVERINGS GENERATED BY DEFORMATIONAL CLADDING WITH FLEXIBLE TOOL

**Bely A. N.**, M.Sc. (Engineering), e-mail: belyy_alex@mail.ru
**Belyavin K. E.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: bntu.omd@mail.ru
**Levantsevich M. A.**, C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: levancev@mail.ru

Belarussian National Technical University, Belarus, 220013, Minsk, Nezavisimosty Ave., 65

**Abstract:** Results of estimating the adhesive strength for bronze (БрО10Ф1) coverings, generated by deformational cladding with flexible tool method are presented. Normal tearing tests were fulfilled for samples with coverings before and after annealing in endogas environment at furnace chamber temperature about 800 … 820 $^0$C. It is established, that adhesive strength at tearing for samples with a covering and without preliminary annealing values range is 11,5 … 13,5 MPa. Thus the coating layer destruction has mixed, adhesive - cohesive character. After annealing the adhesive strength essentially increases and exceeds the glue used technological capabilities in sense of its tearing strength values having a range of 22,5 … 25,0 MPa. The coating layer destruction in this case was not observed. The possibilities of coatings from Ni and Cr use as a sublayer for the subsequent generating the bronze БрО10Ф1coating are also considered.

**Keywords:** covering, deformational cladding, flexible tool, rotating metal brush, annealing, normal tearing, adhesive strength.

**УДК: 621.787.4**

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБКАТКИ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

*С. А. ЗАЙДЕС, доктор техн. наук, профессор,*
*зав. кафедрой машиностроительных технологий и материалов,*
*Д. Ф. ФАМ, аспирант кафедры машиностроительной технологии и материалов*

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова,83.

**Аннотация:** Для деформационного упрочнения деталей типа осей, пальцев, втулок предложен способ поверхностного пластического деформирования, основанный на обкатке заготовки плоскими плитами. Способ позволяет обрабатывать детали, которые не имеют центровых отверстий. При поперечной обкатке исключается также изгиб заготовки от действия поперечных сил нагружения. Получены аналитические зависимости для определения предельно возможной при поперечной обкатке ширины площадки контакта и относительного обжатия.

**Ключевые слова**: поперечная обкатка, относительное обжатие, контактная площадка, заготовка, коэффициент трения.

Решающую роль в обеспечении высокой надежности практически любой детали играют ее поверхностные и подповерхностные слои, являющиеся по условиям работы наиболее нагруженными и поэтому самыми ответственными элементами. В этих слоях сосредоточено наибольшее количество дефектов, и именно там во время эксплуатации зарождаются и развиваются микротрещины, наиболее интенсивно протекают процессы разупрочнения, изнашивания, отслаивания, окисления и т.п., происходит перераспределение остаточных напряжений, что негативно сказывается на работоспособности деталей и узлов машин [1, 2].

Хорошо известно[1-3], что методы поверхностного пластического деформирования (ППД) при сравнительно низких производственных затратах дают большие возможности повышения качества поверхности и улучшения эксплуатационных характеристик широкой номенклатуры деталей. Улучшение качества поверхностного слоя деталей при ППД приводит к повышению эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей, таких как выносливость, износостойкость, коррозионностойкость, контактная выносливость, сопротивление схватыванию металла и др.

Проблемы, возникающие при осуществлении операций поверхностного пластического деформирования, относятся в основном к области технологии, в частности, к поиску наиболее рациональных и высокопроизводительных способов деформирования и к созданию устройств для их реализации.

При обработке деталей типа дисков, тонких осей и валиков возможности обычных методов упрочнения (обработка шариком, роликом) исчерпаны из-за невозможности закрепления заготовок при обработке. Для упрочнения деталей указанного типа необходим способ не требующий осевого закрепления и исключающий изгиб от поперечной нагрузки. В технологии обработки металлов давлением известен способ накатки резьб на станках поперечной прокатки.

Метод поперечой прокатки успешно применяют при обработке металлов давлением. Это объясняется как его технологическими достоинствами, так и значительной эффективностью обработки [4, 5]. Поэтому в качестве перспективного направления можно использовать способ поперечной обкатки как одни из видов ППД. В связи с этим возникла необходимость углубленного изучения этого процесса, разработки общей инженерной методики, позволяющей не только прогнозировать оптимальный выбор основных параметров режимов обработки, но и в процессе их практической реализации осуществлять целенаправленное управление этими параметрами.

В данной статье изложены результаты определения геометрии заготовки и параметров поперечной обкатки (ширина площадки контакта, изменение диаметра заготовки, величина относительного обжатия).

**Определение ширины зоны контакта заготовки с плитами.** На рис. 1 изображена схема процесса поперечной обкатки на плоскопрокатном стане. Расстояние между плитами меньше исходного диаметра цилиндра на величину $2z$, за счет этого диаметр тела уменьшается.

Из рис. 1 видно, что уменьшение радиуса заготовки равно:

$$z = R - \sqrt{R^2 - b^2}, \quad (1)$$

где $R$ – радиус исходного цилиндра,

$b$ – ширина площадки контакта.

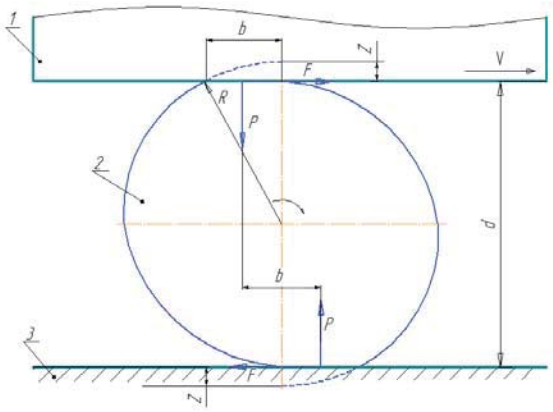



Рисунок 1 – Схема обжатия цилиндра при поперечной обкатке
1 – подвижная плита, 2 – заготовка, 3 – неподвижная плита

Это уравнение можно написать в ином виде:

$$z = R\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{b}{R}\right)^2}\right).$$

Величина $\frac{b}{R}$ всегда значительно меньше единицы. Воспользовавшись биномиальным разложением в ряд и отбросив все члены ряда начиная с третьего, получим:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{b}{R}\right)^2} = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{b}{R}\right)^2 - \frac{1}{2\cdot 4}\left(\frac{b}{R}\right)^4 - \frac{1\cdot 3}{2\cdot 4\cdot 6}\left(\frac{b}{R}\right)^6 - \frac{1\cdot 3\cdot 5}{2\cdot 4\cdot 6.8}\left(\frac{b}{R}\right)^8 - \ldots$$

$$\approx 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{b}{R}\right)^2.$$

Следовательно, приходим к следующему приближенному уравнению:

$$z = R\left(1 - 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{b}{R}\right)^2\right) = \frac{1}{2}\frac{b^2}{R},$$

отсюда

$$b = \sqrt{2Rz}.$$

Поставим в последнее уравнение $R = \frac{d}{2} + z$, где d – диаметр обкатываемого цилиндра, и получим:

$$b = \sqrt{zd + 2z^2}. \quad (2)$$

**Предельная ширина площадки соприкосновения заготовки и плит.** Со стороны каждой из плит к заготовке приложены усилия, которые направлены нормально к контактной площадке. Равнодействующую этих усилий P будем считать приложенной в середине отрезка, соответствующего плоскости соприкосновения заготовки с плитами. Нормальные усилия вызывают появление на площадки контакта заготовки с плитами силы трения, равнодействующую которых обозначим через F. Силы трения F приложены в тех же точках, что и нормальные усилия P и направлены по касательным к площадки контакта (рис. 1).

Силы трения F, приложенные со стороны плит к заготовке, образуют крутящий момент $M_1 = F \cdot d = P \cdot \mu \cdot d$, где $\mu$ – коэффициент трения о поверхность обкатываемой заготовки. Момент $M_1$ вызывает вращение заготовки.

Нормальные усилия P создают крутящий момент $M_2 = P \cdot b$, направленный в сторону, противоположную направлению вращения заготовки.

При захвате в момент поворота заготовки, по С. П. Грановскому [6], должно быть выдержано условие

$$M_1 - M_2 = M_{\partial}, \quad (3)$$

где $M_{\partial}$ – динамический момент.

Для осуществления установившегося процесса поперечной обкатки необходимо соблюдение соотношения

$$M_1 > M_2,$$

или

$$P \cdot \mu \cdot d > P \cdot b,$$

откуда

$$\mu > \frac{b}{d}. \quad (4)$$

При увеличении обжатия заготовки возрастает ширина контактной площадки, что приводит к увеличению плеча $b$ при одновременном уменьшении плеча $d$. Таким образом, с ростом обжатия правая часть неравенства (4) возрастает. При достаточно большой величине обжатия неравенство (4) перестает выполняться. Вращение заготовки в плитах прекращается в том случае, когда

$$M_1 = M_2,$$

то есть $$P \cdot \mu \cdot d = P \cdot b_0,$$

отсюда $$b_0 = \mu \cdot d,$$

(5)

где $b_0$ –предельная ширина площадки соприкосновения заготовки и плит.

**Предельное обжатие при поперечной обкатке.** Для определения предельного обжатия за один оборот заготовки при поперечной обкатке воспользуемся формулой (2). Возводя обе части равенства в квадрат, получаем:

$$b^2 = zd + 2z^2.$$

После простых преобразований приходим к следующему квадратному уравнению относительно $z$:

$$z^2 + \frac{d}{2}z - \frac{b^2}{2} = 0.$$

Из этого уравнения

$$z_{1,2} = -\frac{d}{4} \pm \sqrt{\frac{d^2}{16} + \frac{b^2}{2}} = -\frac{d}{4} \pm \frac{d}{4}\sqrt{1 + 8\left(\frac{b}{d}\right)^2}. \quad (6)$$

Отношение $\frac{b}{d}$ значительно меньше единицы. Отсюда следует, что дробь, стоящая под радикалом, меньше единицы. На этом основании равенство (6) приближенно можно написать в следующем виде:

$$z_{1,2} = -\frac{d}{4} \pm \frac{d}{4}\left(1 + 4\left(\frac{b}{d}\right)^2\right).$$

Исследование этих двух решений показывает, что корнем уравнения, имеющим физический смысл, является

$$z_1 = -\frac{d}{4} + \frac{d}{4}\left(1 + 4\left(\frac{b}{d}\right)^2\right) = \frac{b^2}{d}.$$

При критическом случае получено равенство $b = \mu \cdot d$.

Подставляя это выражение в предыдущее, имеем

$$z = \frac{\mu^2 \cdot d^2}{d} = \mu^2 \cdot d. \quad (7)$$

По равенству (7) можно определить максимальную величину относительного обжатия заготовки в плитах в зависимости от коэффициента трения.

Относительное обжатие при обкатке определяется по формуле:

$$Q = \frac{d^2 - d'^2}{d^2} \cdot 100\%,$$

где $d'$ – конечный диаметр детали.

Эту формулу можно написать в следующем виде:

$$Q = \left(1 - \left(\frac{d'}{d}\right)^2\right) \cdot 100\%.$$

При критическом случае конечный диаметр цилиндра $d'$ можно выразить через исходный диаметр $d$:

$$d' = d - 2z = d - 2\mu^2 \cdot d = (1 - 2\mu^2)d.$$

Тогда получим предельное значение $Q$:

$$Q = [1 - (1 - 2\mu^2)^2] \cdot 100\%. \quad (8)$$

Значение коэффициента трения для пары сталь-сталь при холодной обкатке находится в пределах от 0,03 до 0,15 [5]. По формулам (7) и (8) построены кривые зависимости придельного обжатия (Рис. 2) и предельного относительного обжатия (Рис. 3) от коэффициента трения.

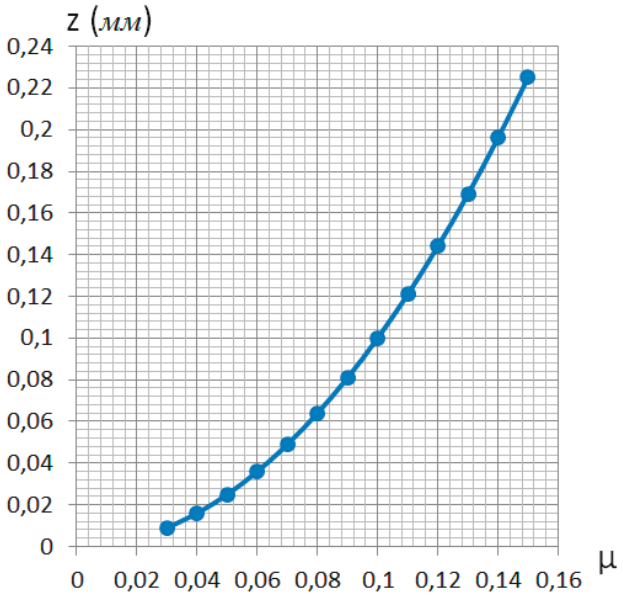



Рисунок 2 – Зависимость предельного абсолютного обжатия от коэффициента трения (цилиндр диаметром 10мм)

Графики показывают, что с уменьшением коэффициента трения предельное обжатие заготовки уменьшается. При этом коэффициент трения оказывает большое влияние на величину предельного обжатия. Для осуществления нормального процесса поперечной обкатки необходимо строить процесс таким образом, чтобы значение относительное обжатие Q всегда было

меньше предельного. Все методы обработки ППД проводятся с относительным обжатием около 1%. Это значит по этой схеме обработки если значение коэффициента трения μ больше 0,05, то процесс поперечной обкатки обязательно происходит.

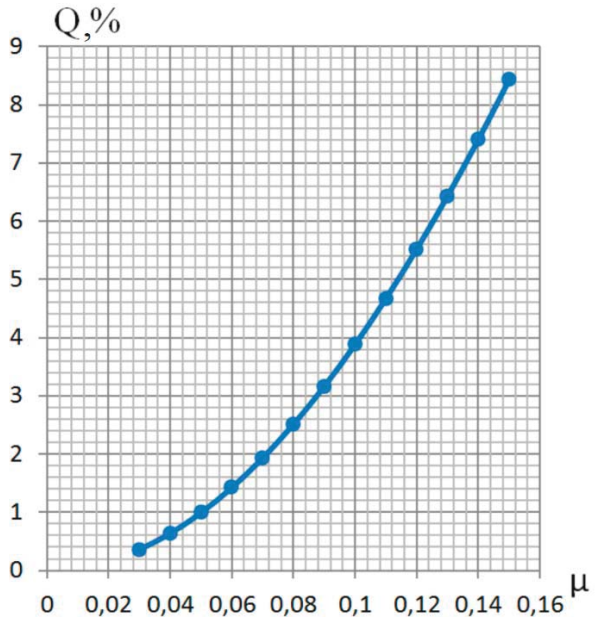



Рисунок 3 –Зависимость предельного относительного обжатия от коэффициента трения

**Выводы**

1. Для пластического упрочнения цилиндрических деталей типа осей, пальцев, втулок, предложена схема поверхностного пластического деформирования, исключающая закрепление заготовок. Обработка происходит за счет вращения заготовки между плоскими плитами.
2. Определена ширина контакта заготовки с плоскими плитами, зависящая от степени обжатия и диаметра детали. Предельная ширина площадки контакта зависит и от коэффициента трения между заготовкой и плоскими плитами.
3. Получено аналитическое выражение для предельного обжатия заготовки при поперечной обкатке.

## Список литературы

1. *Папшев Д.Д.* Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
2. *Зайдес С.А.* Технологическое управление остаточными напряжениями при охватывающем деформировании // Вестник ИрГТУ. – 1998. – N3. – С.92 – 97
3. *Зайдес С.А., Забродин В.А., Мураткин Г.В.* Поверхностное пластическое деформирование. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ.2007. – 404с
4. *Щукин В.Я.* Поперечно-клиновая прокатка в машиностроении // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития: сборник научных трудов под ред. В.А. Струка, В.И. Кравченко. - Гродно:УО ГГАУ, 2008. – С.195-207.
5. *Щукин В.Я.* Основы поперечно-клиновой прокатки / Под ред. А.В.Степаненко. – Мн.: Наука и техника, 1986. – 223с.
6. *Смирнов В.С. и др.* Поперечная прокатка в машиностроении. Москва; Ленинград: МАШГИЗ, 1957. – 376 с.

## DETERMINATION OF TRANSVERSE BURNISHING CONDITIONS UNDER SURFACE PLASTIC DEFORMATIONS

**Zaides S. A**, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Materials, tel.: (3952) 405 147, email: zsa@istu.edu

**Pham D. Ph.**, Postgraduate of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Materials, tel.: 89246069558, email: dacphuong.ru88@gmail.com

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

**Abstract:** A method of surface plastic deformation based on work piece burnishing with flat plates is proposed for mechanical hardening of axles, fingers, bushings etc. The method allows to machine parts that do not have center holes. Transverse burnishing also eliminates the work piece bend caused by the action of shear loading forces. The paper obtains analytical dependences for the determination of the maximum possible contact area width and percentage reduction under transverse burnishing.

**Keywords:** transverse burnishing; percentage reduction; contact area; work piece; coefficient of friction.

**УДК 621.77**

# ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВНОЙ СТЕРЖНЕВОЙ ДЕТАЛИ С ПОЛОСТЬЮ В УТОЛЩЕНИИ ИЗ СБОРНОЙ ЗАГОТОВКИ

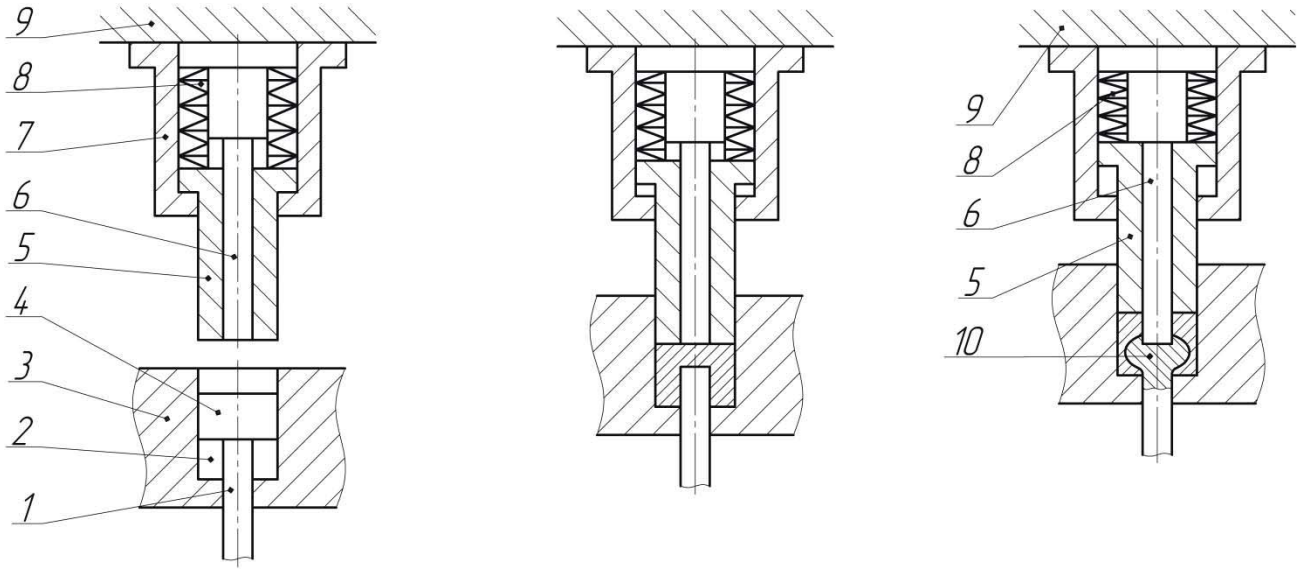
*С. В. ГЕРМАН*
*М. И. ПОКСЕВАТКИН*
*Е. М. БАСОВА*
*К. Ю. ДУНАЕВ*

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
656038, пр. Ленина, 46, г. Барнаул, Алтайский край, РФ

**Аннотация:** Рассмотрен способ получения высокоточных стержневых заготовок с полостью в утолщении, согласно которому осуществляется одновременное воздействие на исходную заготовку пуансона и прошивня. При этом усилие противодавления, прилагаемое к пуансону равно по величине усилию высадки утолщения.

**Ключевые слова:** одноперехо́дная штамповка, соосное фиксирование, стержневая заготовка, прошивка.

При одноперехо́дной штамповке стержневых деталей с полостью в утолщении (например, клапанов, болтов и др.) неизбежно смещение оси стержневой заготовки относительно оси прошивня в начальный период деформирования. Это обуславливает неравномерную раздачу металла в радиальном направлении и одностороннее заполнении полости штампа. Поэтому обычно используют двухперехо́дную штамповку заготовок: высадку утолщения и последующую прошивку полости.




а б в

Рисунок 1 – Схемы одноперехо́дной штамповки стержневых деталей с полостью в утолщении из сборной заготовки (а – исходное положение штампа; б – момент сборки стержневой и головной заготовок; в – момент завершения формовки утолщения): 1 – стержневая заготовка; 2 – полость штампа; 3 – матрица; 4 – головная заготовка; 5 – деформирующий пуансон; 6 – прошивень; 7 – обойма; 8 – упругий элемент; 9 – верхняя часть штампа; 10 – деталь с полостью в утолщении, полученная из сборной заготовки.

Для получения высокоточных стержневых заготовок с полостью в утолщении разработан способ [1], согласно которому высадку утолщения, прошивку полости и формовку осуществляют одновременным воздействием на исходную заготовку пуансона и прошивня, прилагая к пуансону усилие противодавления, равное по величине усилию высадки утолщения.

Этот способ может быть успешно использован при одноперехо́дном формировании состав-

ных стержневых деталей с полостью в утолщении из сборной заготовки, получаемой совместным пластическим деформированием стержневой 1 и головной 4 заготовок [2] (рис. 1). Составные детали находят все более широкое применение благодаря значительной экономии дорогостоящих специальных сталей (жаропрочных, износостойких и др.)

Формирование составной детали осуществляют следующим образом. Стержневую заготовку 1 размещают в полости 2 матрицы 3 (рис. 1, а). Затем в полость 2 матрицы 3 с минимальным зазором подают нагретую до ковочной температуры головную заготовку 4, изготовленную из специальной стали конкретного назначения (рис. 1, а). Под действием пуансона 5, размещенного в обойме 7 и опирающегося на упругий элемент 8 (например, комплект тарельчатых пружин), головную заготовку 4 вдавливают в стержневую заготовку 1 до упора в дно матрицы 3 (рис. 3, б). При этом, торец прошивня 6, установленного в центральном осевом отверстии пуансона 5 с утопанием в 2-3 мм, совмещается с поверхностью торца деформирующего пуансона 5. В процессе дальнейшего движения верхней части 9 штампа прошивнем 6 осаживают выступающую часть стержневой заготовки 1, формируя одновременно полость заданной глубины и профиля (рис. 1, в).

Приложение к головной заготовке 4 усилия противодавления упругого элемента 8 в процессе формирования утолщения и полости в головной части детали создает в объеме металла всестороннее неравномерное сжатие, обеспечивающее прочное неразъемное соединение заготовок составной детали 10 (рис. 1, в).

Прочность соединения заготовок усиливается в результате охлаждения металла головной заготовки 4.

Одновременное воздействие на сборную заготовку пуансона и прошивня обеспечивает соосное фиксирование заготовки относительно инструментов за счет контактных сил трения, возникающих на всей торцевой поверхности заготовки. Поэтому в процессе прошивки протекает равномерная раздача металла в радиальном направлении и благоприятное заполнение полости штампа при формовке, что позволяет получать детали высокого качества.

**Выводы.**

1. Разработан способ получения составных стержневых деталей из сборных заготовок.

2. Использование высокого гидростатического давления в процессе формирования полого утолщения детали обеспечивает высокое качество соединения сборных заготовок.

## Список литературы

1. Способ одноперехoдной штамповки стержневых деталей с полостью в утолщении [Текст]: пат. 2391172 Рос. Федерация: МПК B21J 5/06 B21K 1/46 / Поксеваткин М.И., Бедарев М.В., Мамонтов М.С., Дунаев К.Ю., Поксеваткин Д.М.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ). – 2009110587/02; заявл. 23.03.2009; опубл. 10.06.2010, Бюл. №16. – 7 с: ил.

2. Способ получения составных деталей [Текст]: пат. №2056209 Рос. Федерация: МПК B 21 K1/22. Поксеваткин М.И., Осколков А.И., Гуляев Ю.А., Кузнецов Л.П., Перетятько В.Н.; заявл. 18.05.92; опубл. 20.03.96 Бюл. № 8.

# FORMATION OF A COMPOUND ROD DETAIL WITH A CAVITY IN A THICKENING FROM MODULAR PREPARATION

**German S. V.,**
**Poksevatkin M. I.,**
**Basova E. M.,**
**Dunaev K. Y.**

I.I. Polzunov Altai state technical university, 656038, pr. Lenina, 46, Barnaul, Altajskij kraj
aspirant007@list.ru, 9133604663@mail.ru, kir_kir87@mail.ru

**Abstract:** The way of reception of precision rod preparations with a cavity in a thickening according to which simultaneous influence on initial preparation of a punch and прошивня is carried out is considered. Thus the effort противодавления, applied on a punch is equal on size to effort of landing of a thickening.

**Keywords:** unijunction stamping, coaxial fixation, rod preform firmware.

**УДК 539.375:621.77**

# АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СТЕРЖНЕВОЙ ДЕТАЛИ С ПОЛОСТЬЮ В УТОЛЩЕНИИ

*С. В.ГЕРМАН*
*М. И. ПОКСЕВАТКИН*
*К. Ю. ДУНАЕВ*
*Е. М. БАСОВА*

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
656038, пр. Ленина, 46, г. Барнаул, Алтайский край, РФ

**Аннотация:** Представлен алгоритм расчета параметров одноперехо́дной штамповки стержневых заготовок с полостью в утолщении

**Ключевые слова:** одноперехо́дная штамповка, алгоритм, стержневая заготовка.

Процесс формирования стержневых деталей с полостью в утолщении [1] описан алгоритмом, который представлен на рисунке 1. В блоке 1 вводят исходные данные. Затем определяют усилие высадки ($P_в$) (блок 2):

$$P_в = k \cdot \sigma_{вт} \cdot F_k \quad (1)$$

где $k$ – коэффициент, выбираемый в зависимости от соотношения размеров утолщения;

$\sigma_{вт}$ – сопротивление деформации металла, равное при горячей штамповке пределу прочности при температуре окончания процесса, МПа;

$F_k$ – площадь торцевой поверхности заготовки к моменту окончания высадки, мм$^2$.

Далее проверяют условие продольной устойчивости исходной заготовки (блоки 3-12) в зависимости от относительной длины высадки и угла скоса торца заготовки:

$$\varphi = l_в / D \le \varphi_д, \quad (2)$$

где $\varphi$ и $\varphi_д$ – соответственно фактическая и допустимая относительные длины заготовок;

$l_в$ и $D$ – соответственно длина и диаметр высаживаемой части заготовки.

Допустимое значение параметра $\varphi_д$ определяется по формуле [1]:

$$\varphi_д = k(4{,}84\sqrt{n_i} - 5{,}7\mathrm{tg}\gamma) \le 2{,}7, \quad (3)$$

где $k = 1$ при $D \ge 50$ мм, $k = (0{,}85 + 3 \cdot 10^{-3} D)$ при $D < 50$ мм;

$n_i = E_i \cdot \varepsilon_i / \sigma_i$ – коэффициент упрочнения, определяемый по кривой упрочнения стали при конкретных температурно-скоростных условиях деформации;

$E_i = d\sigma_i / d\varepsilon_i$ – касательный модуль;

$\varepsilon_i$ и $\sigma_i$ – степень деформации и соответствующее ей напряжение деформации в i-й момент времени;

$d\varepsilon_i$ и $d\sigma_i$ – приращение деформации и соответствующее ему приращение напряжения по кривой упрочнения в окрестностях точки с коэффициентами $\varepsilon_i$;

$\gamma$ – угол скоса торца заготовки; при ориентировочных расчетах можно принять $\varphi_д = 2 \div 3$ при $0 \le \gamma \le 6°$.

В блоке 13 по усилию высадки выбирают комплект ($N$) тарельчатых пружин (упругий элемент) и проверяют условие равенства усилия сжатия ($P_k$) комплекта пружин и усилия высадки (блоки 14-19):

$$P_k = P_{сж} \cdot N = P_в, \quad (4)$$

где $P_{сж}$ - усилие сжатия одной пружины.

Далее определяют высоту ($h_э$) комплекта ($N$) пружин в исходном состоянии (блок 20):

$$h_э = t \cdot N, \quad (5)$$

где t – толщина пружины, мм.

В блоке 21 определяют величину сжатия упругого элемента к моменту окончания высадки:

$$h_{сж} = f \cdot N, \quad (6)$$

где $f$ – прогиб одной пружины, мм.

И проверяют условие равенства величины сжатия ($h_{сж}$) упругого элемента и глубины ($h_п$) полости в утолщении заготовки (блок 22).

Алгоритм реализован компьютерной программой, которая успешно опробована.

**Вывод**

Разработан алгоритм процесса одноперехо́дной штамповки стержневых заготовок с полостью в утолщении.

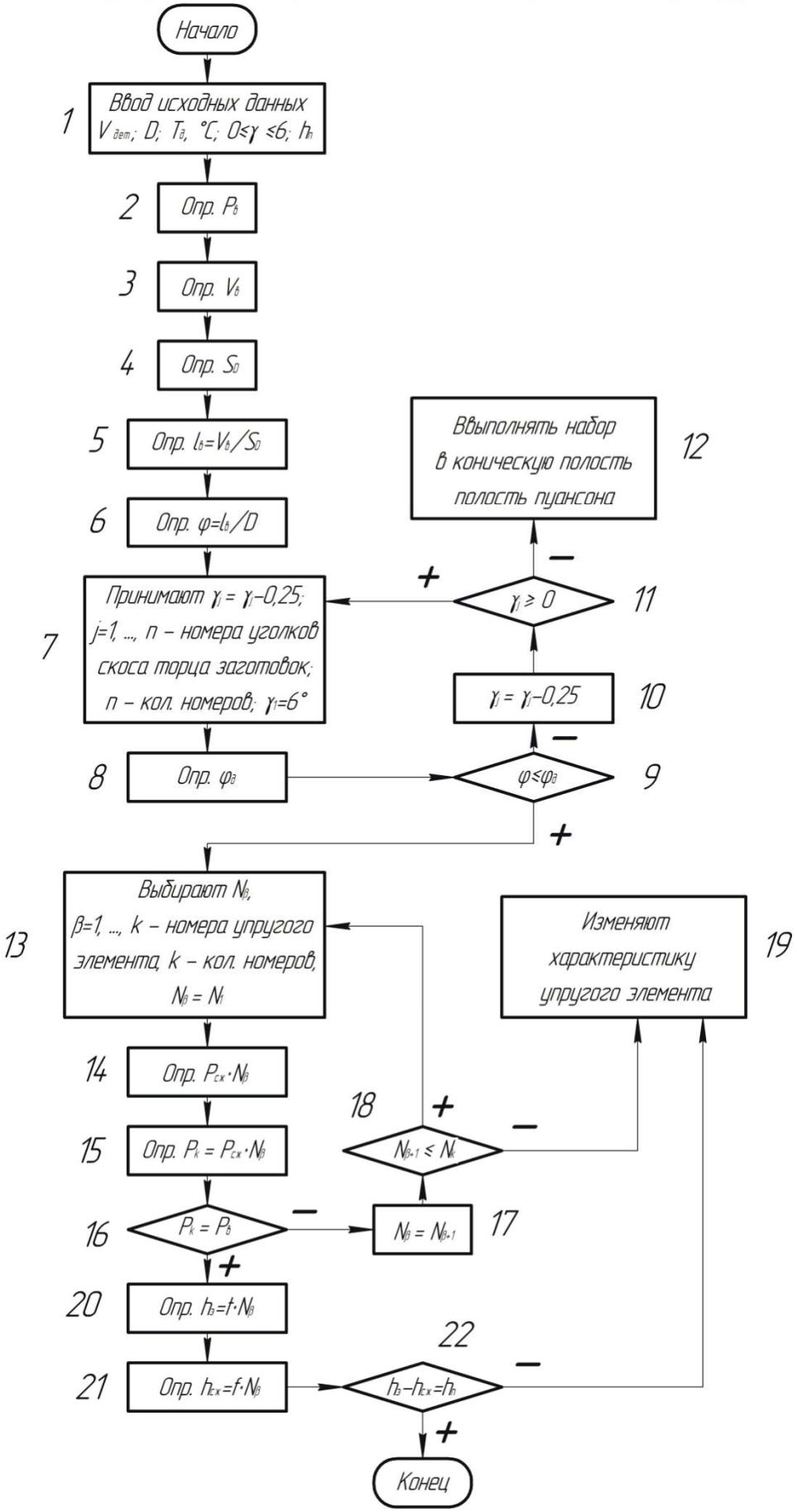

Начало
1
Ввод исходных данных
$V_{дет}$; D; $T_д$, °C; 0≤γ ≤6; $h_т$
2
Опр. $P_д$
3
Опр. $V_д$
4
Опр. $S_0$
5
Опр. $l_д=V_д/S_0$
6
Опр. $\varphi=l_д/D$
7
Принимают $\gamma_j = \gamma_j-0,25$;
j=1, ..., n – номера уголков скоса торца заготовок;
n – кол. номеров; $\gamma_1=6°$
8
Опр. $\varphi_д$
9
$\varphi \le \varphi_д$
+
–
10
$\gamma_j = \gamma_j-0,25$
11
$\gamma_j \ge 0$
+
–
12
Ввыполнять набор
в коническую полость
полость пуансона
13
Выбирают $N_\beta$,
β=1, ..., k – номера упругого элемента, k – кол. номеров,
$N_\beta = N_1$
14
Опр. $P_{сж} \cdot N_\beta$
15
Опр. $P_к = P_{сж} \cdot N_\beta$
16
$P_к = P_д$
–
+
17
$N_\beta = N_{\beta+1}$
18
$N_{\beta+1} \le N_к$
+
–
19
Изменяют
характеристику
упругого элемента
20
Опр. $h_д=f \cdot N_\beta$
21
Опр. $h_{сж}=f \cdot N_\beta$
22
$h_д - h_{сж} = h_т$
–
+
Конец

Рисунок 1 – Алгоритм расчета параметров одноперехoдной штамповки стержневых заготовок с полостью в утолщении.

## Список литературы.

1. Способ одноперехoдной штамповки стержневых деталей с полостью в утолщении [Текст]: пат. 2391172 Рос. Федерация: МПК B21J 5/06 B21K 1/46 / Поксеваткин М.И., Бедарев М.В., Мамонтов М.С., Дунаев К.Ю., Поксеваткин Д.М.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ). – 2009110587/02; заявл. 23.03.2009; опубл. 10.06.2010, Бюл. №16. – 7 с: ил.

2. Ковка и штамповка. Справочник. [Текст]: Под ред. Семенова Е.И. – М.: Машиностроение, 1986. – 592 с.

## ALGORITHMIZATION PROCESS OF FORMING A CORE PART WITH A CAVITY IN THE THICKENING

**German S. V.,**
**Poksevatkin M. I.,**
**Dunaev K. Yu.,**
**Basova E. M.**

I.I. Polzunov Altai state technical university 656038, pr. Lenina, 46, Barnaul, Altajskij kraj
aspirant007@list.ru, 9133604663@mail.ru, kir_kir87@mail.ru

**Abstract:** An algorithm for calculating the parameters of unijunction stamping rod preform with a cavity in the thickening.

**Keywords:** unijunction stamping, algorithm, rod preform firmware.

**УДК 621.77**

# КОМБИНИРОВАННЫЙ ПРОЦЕСС ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ И ШТАМПОВКИ

*Г. В. КОЖЕВНИКОВА, кандидат техн. наук*,
(*ФТИ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь*)

Кожевникова Г. В. – 220141, г. Минск, ул. Купревича, 10,
Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

**Аннотация**: Комбинирование процесса поперечно-клиновой прокатки со штамповкой позволяет получать различные поковки с удлиненной осью с новыми улучшенными эксплуатационными свойствами и экономить металл и электроэнергию.

**Ключевые слова:** Пластическое деформирование, поперечно-клиновая прокатка, штамповка, карданный вал, шуруп путевой.

**Введение**

Поперечно-клиновая прокатка (ПКП) – высокоточный процесс обработки металлов давлением, обеспечивающий получение осесимметричных валов, которые могут использоваться как для изготовления путем резания и шлифовки валов механизмов и машин, так и для последующей штамповки поковок с удлиненной осью [1, 2]. При этом операцию штамповки можно осуществить, используя тепло заготовки, оставшееся после прокатки.

ПКП изготовляют заготовки в виде тел вращения с удлиненной осью, формообразование которых осуществляется за счет перераспределения металла вдоль оси заготовки клиновыми инструментами, движущимися поперек оси заготовки. Конфигурация получаемых деталей может быть разнообразной: цилиндрические, конические и сфероидальные поверхности с различными канавками и выступами. Методом ПКП обрабатываются все конструкционные стали, а также сплавы на основе меди, титана, никеля, циркония и алюминия.

В ФТИ НАН Беларуси разработана классическая теория поперечной прокатки, положенная в основу теории и технологии ПКП, проведены глубокие исследования вязкого разрушения при пластических деформациях [3]. Разработанные здесь технологии и соответствующая технологическая оснастка ПКП обеспечивают [4]: коэффициент использования металла – 0,8-0,98, стойкость плоско-прокатного инструмента до его полного выхода из строя – около 1 млн штук изделий, производительность процесса в зависимости от конфигурации изделия и схемы прокатки – 300-720 шт/час, повышение эксплуатационных характеристик прокатанных изделий на 10-15 %. Точность ПКП настолько высока, что после нее возможно осуществлять безоблойную штамповку. Разработана гамма прокатного оборудования для прокатки деталей диаметром 5÷190 мм и длиной 30÷1000 мм. При этом обеспечивается изготовление деталей или полуфабрикатов диаметром от 2 мм до 190 мм длиной от 40 мм до 1000 мм, максимально достигаемая точность 0,01 мм (на диаметре 7 мм), максимально достигаемая чистота поверхности – 0,6 Ra.

**Комбинированная технология поперечно-клиновой прокатки и штамповки вилки кардана**

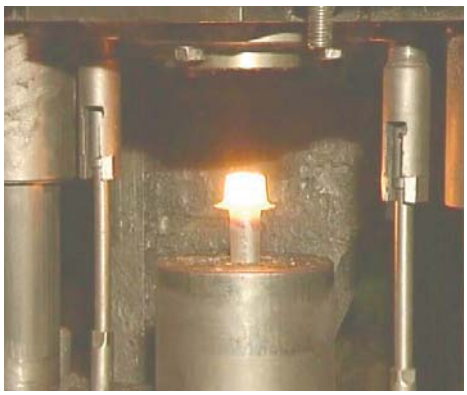
Технология производства вилки карданного вала грузового автомобиля разработана для ОАО «Белкард» (Гродненский завод карданных валов). Технология включает в себя: нагрев заготовки, ПКП на клиновом инструменте для получения промежуточной заготовки, штамповку с того же нагрева промежуточной заготовки на горячештамповочном прессе (рис. 1), обрезку облоя. ПКП профилированной заготовки под последующую штамповку вилок карданных валов производится на стане ПКП ПМ5-150 конструкции ФТИ НАН Беларуси.

Рисунок 1 – Технология ПКП и штамповки вилки карданного вала:
1 – мерная прутковая заготовка;
2 – профилированная заготовка после ПКП под последующую штамповку;
3 – поковка вилки карданного вала после штамповки и обрезки облоя

При проведении работ по разработке технологического процесса изготовления поковок вилок карданных передач из полуфабриката, полученного методом ПКП, возникла необходимость определить изменение температуры нагрева исходной заготовки в процессе предварительного профилирования. График зависимости температуры от натурального логарифма времени представляет собой прямую линию, т.е. между температурой и временем осуществляется экспоненциальная зависимость [5, 6]. Падение температуры для случаев прокатки с темпом прокатки 15 с составляет 100 К. Для случая прокатки с темпом прокатки 8 с падения температуры не наблюдается. Из полученных данных видно, что с увеличением скорости прокатки охлаждение заготовки уменьшается. Отмечено, что при прокатке заготовок диаметром от 70 до 100 мм с темпом прокатки 6 с будет наблюдаться разогрев заготовок.

**Комбинированная технология штамповки и поперечно-клиновой прокатки шурупов путевых**

Технология производства шурупа путевого включает рубку заготовки на прессе, зонный нагрев ТВЧ части заготовки, безоблойную штамповку головы шурупа на прессе (рис. 2, а), зонный нагрев ТВЧ недеформированной части заготовки, ПКП резьбовой части шурупа на плоско-прокатном стане конструкции ФТИ НАН Беларуси (рис. 2, б).



а

б

Рисунок 2 – Штамповка (а) и ПКП (б) шурупа путевого

С целью повышения характеристик точности шурупа путевого, улучшения качества поверхности, снижения усилия обработки при изготовлении данного изделия способом ПКП разработаны режимы деформирования, позволяющие максимально реализовать ресурс пластичности [7–9], и на их основе разработана технология ПКП шурупа путевого. Старая конструкция клинового инструмента позволяла получать точность по шагу резьбы 12,5 мм до ±0,6 мм, шероховатость поверхности Rz 160. Шурупы с такой точностью изготовления применяются для крепежа рельса по традиционной технологии, которая заключается во ввинчивании шурупа в предварительно подготовленное отверстие в деревянной шпале. Современная конструкция предполагает ввинчивание шурупа в пластмассовый дюбель, предварительно установленный в бетонной шпале. Ввиду этого требования к точности по шагу резьбы возрастают в 6 раз, т.е. величина шага резьбы должна составить 12,5 ± 0,1 мм. Уменьшение величины шероховатости поверхности шурупа позволяет снизить усилие ввинчивания. На рис. 3 представлен полученные по новой технологии поковки шурупов путевых, отвечающие этим требованиям.

Рисунок 3 – Шурупы путевые, полученные способом ПКП с различным исполнением головы шурупов

В соответствии с ТУ BY100185302283–2012 временное сопротивление разрыву шурупа путевого составляет 500 Н/мм$^2$. Проведенные в ФТИ НАН Беларуси испытания на растяжение образца диаметром 10 мм и длиной рабочей части 76 мм на испытательной машине ZD 10/90 показали значение данного параметра при нормативном 50 %. В итоге ПКП резьбовой части шурупа благоприятно сказалась на его прочностных и пластических свойствах. Коэффициент использования металла в результате полного цикла обработки шурупа путевого составляет 0,98.

**Выводы**

В результате внедрения технологии поперечно-клиновой прокатки и штамповки вилки кардана получен значительный экономический эффект: штамповка поковки вилки происходит без дополнительного нагрева, прокатка заготовки осуществляется автоматически. Применение новой технологии производства вилок карданных валов на основе комбинирования ПКП и последующей штамповки позволило значительно уменьшить объем металла, уходящий в облой. Получение шурупа путевого по новой технологии позволило создать практически безотходное производство. Применение новых критериев разрушения в рамках условия пластичности привело к улучшению качества получаемого изделия. Временное сопротивление разрыву составило 569 ÷ 625 Н/мм$^2$. Таким образом, ПКП увеличила прочность шурупа путевого на 14 ÷ 15 %. Предел текучести при испытаниях составил 385 ÷ 413 Н/мм$^2$, что превышает нормативный показатель 300 Н/мм$^2$. Относительное удлинение составило 24 ÷ 30 % при нормативном 18 %, относительное сужение – 51 ÷ 57,8 %

Дальнейшее развитие ПКП видится в решение научной проблемы повышения эффективности процесса за счет наиболее полного использования пластических свойств металлов, создания практически безотходных технологий с коэффициентом использования металла 0,95-0,98 и получения готовых изделий без применения чистовых операций механической обработки.

## Список литературы

1. *Щукин, В.Я.* Основы поперечно-клиновой прокатки / В.Я. Щукин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 223 с.

2. *Щукин, В.Я.* Новое в поперечно-клиновой прокатке / В.Я. Щукин, Г.В. Кожевникова, А.О. Рудович // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 3. – С. 35–37.

3. *Кожевникова, Г.В.* Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 291 с

4. *Shchukin, V.Y.* Cross-wedge rolling at PTI NAS Belarus / V.Y. Shchukin, G.V. Kozhevnikova, V.V. Petrenko // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 201–202. – P. 1198–1202.

5. *Çakırcalı, M.* Cross wedge rolling of a Ti6Al4V (ELI) alloy: the experimental studies and the finite element simulation of the deformation and failure / M. Çakırcalı, C. Kılıçaslan, M. Güden, E. Kıranlı, V.Y. Shchukin, V.V. Petronko // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 65, Issue 9-12. – pp 1273–1287.

6. Evaluating the nature of the pressure distribution in a powder in electric-impulse sintering under conditions of uniaxial two-sided elastic prepressing / O.O. Kuznechik, D.V. Minko, K.E. Belyavin, E.G. Grigoryev / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – Vol. 86, Issue 5. – P. 1240–1250.

7. *Кожевникова, Г.В.* Построение эпюр контактных напряжений на границе инструмент–заготовка при поперечной прокатке / Г.В. Кожевникова // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 1. – С. 94–99.

8. *Кожевникова, Г.В.* Условия устойчивого протекания поперечной и поперечно-клиновой прокаток / Г.В. Кожевникова // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2009. — № 1 (22). — С. 44–53.

9. *Kozhevnikova, G.* Cross-wedge rolling / G. Kozhevnikova. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2012. – 321 c.

## COMBINED PROCESS OF CROSS-WEDGE ROLLING AND STAMPING

**Kozhevnikova G. V.**, C.Sc. (Engineering), Chief Researcher, e-mail: fti@tut.by

State Scientific Institution “The Physical Technical Institute of the National Academy of sciences of Belarus”, 10 street Kuprevich, Minsk, 220141, Belarus

**Abstract:** Combination of cross-wedge rolling and stamping makes it possible to produce various forged pieces with elongated axis, which have new advanced performance characteristics and lets to economize metal and electric power.

**Keywords:** Plastic deforming, cross-wedge rolling, stamping, cardan shaft, railroad screw.

**УДК 621.77**

# ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОЙ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ

*Г. В. КОЖЕВНИКОВА, кандидат техн. наук*,
(*ФТИ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь*)

Кожевникова Г. В. – 220141, г. Минск, ул. Купревича, 10,
Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», e-mail: fti@tut.by

**Аннотация:** Поперечно-клиновая прокатка с температурой нагревом стальных заготовок до 970 ÷ 1170 К на порядок улучшает качество прокатанных изделий по сравнению с горячей прокаткой.

**Ключевые слова:** Пластическое деформирование, поперечно-клиновая прокатка, ресурс пластичности.

**Введение**

Совершенствование технологий поперечно-клиновой прокатки (ПКП) идет в направлении разработки практически безотходных технологий с коэффициентом использования металла 0,95–0,98 и получения готовых изделий без применения чистовых операций механической обработки [1, 2]. В зависимости от температуры нагрева прокатываемых заготовок различают горячую, теплую и холодную прокатки [3].

ПКП стали с нагревом более 1170 К названа **горячей** прокаткой. Эта прокатка универсальна и поэтому получила самое широкое применение в промышленности. Горячая прокатка хорошо себя зарекомендовала при обработке конструкционных сталей, титана, латуни, высоколегированных сталей, в том числе инструментальных.

ПКП без нагрева названа **холодной** прокаткой. Область ее применения ограничена. Обычно это массовое производство мелких валиков диаметром 1 ÷ 5 мм из латуни, стали, циркония.

ПКП с нагревом стальных заготовок до 970 ÷ 1170 К названа **теплой**_прокаткой. Прокатка с такой температурой на порядок улучшает качество прокатанных изделий по сравнению с горячей прокаткой. Применение теплой ПКП для производства типовых деталей автомобилестроения экономически выгоднее традиционных технологий и является перспективным направлением ближайшего времени.

**Теоретические основы построения технологий теплой прокатки**

Теплая ПКП позволяет получать точность диаметральных размеров, до 10 мкм (на диаметре 7 мм), и шероховатость поверхности – до 0,6 Ra. Это позволяет во многих случаях теплой ПКП заменять шлифовку, открывая новую нишу для использования данного процесса в металлообработке [4]. Низкая шероховатость поверхности достигается отсутствием окалины при нагреве и прокатке заготовок, так как температура теплой ПКП ниже температуры начала окалинообразования. Исходные заготовки необходимо лишь подвергнуть галтовке перед нагревом в случае применения горячекатаного проката.

Высокая точность прокатываемых деталей достигается деформированием при некотором снижении пластичности, а также уменьшением влияния тепловой усадки при охлаждении. Учет ограниченной пластичности прокатываемого материала при пониженной температуре при разработке технологий теплой ПКП требует точных расчетов компонент напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и ресурса пластичности [5].

Задача определения компонент напряжений при ПКП является объемной и не решается аналитически. Единственным достоверным методом ее решения является приближенный метод – метод конечных элементов. При определении параметров напряженно-деформированного состояния использована разработанная компьютерная модель процесса ПКП [6], построенная на базе пакета программ LS-DYNA, использующих метод конечных элементов.

Согласно [3, 6, 7] в напряженном состоянии необходимо учитывать два взаимозависимых фактора: среднее напряжение $\sigma/K$ и параметр третьего инварианта девиатора напряжений $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$, где $\sigma$ – среднее нормальное напряжение, К – пластическая постоянная материала, $J_3(D_\sigma)$ – третий инвариант девиатора напряжений. Наши исследования показали, что область материалов с ограниченной пластичностью может быть определена количественно: предельная степень деформации сдвига в ней лежит в пределах от 1,5 до 5,0 при напряжениях, реализуемых на оси заготовки, то есть среднее напряжение в пределах от 0 до 0,7 и третий инвариант девиатора напряжений от –1,0 до –0,45. Если предельная степень деформации сдвига при указанном напряженном состоянии выше 5,0 – это высоко пластичный материал, если

ниже 1,5 – это материал с низкой пластичностью.

При определении напряженно-деформированного состояния использован деформационный критерий разрушения, который наиболее точно описывает феномен вскрытия полости при поперечной прокатке и ПКП [7, 8]. Суть деформационного критерия разрушения заключается в том, что разрушение наступает тогда, когда суммарная накопленная деформация при постоянных параметрах процесса достигнет критического уровня, который для одного и того же металла изменяется в зависимости от большого количества факторов. Влияние на ресурс пластичности оказывают температура нагрева, напряженно-деформированное состояние, нелинейность накопления повреждаемости, немонотонность деформации.

Применение теплой ПКП позволяет значительно снизить мощность тиристорных преобразователей частоты при индукционном нагреве, либо вообще отказаться от дорогостоящих ТПЧ в пользу специальных автоматизированных электропечей сопротивления.

Однако снижение интервала температур прокатки предъявляет более высокие требования к конструктивным особенностям оборудования для теплой ПКП [9]. В первую очередь необходимо обеспечить более высокую скорость и точность перемещения инструмента и соответственно существенно увеличить жесткость прокатной клети стана. Кроме того, углы заострения клина при теплой ПКП значительно меньше, чем при горячей, и в связи с этим необходима большая длина клинового инструмента.

**Технологии теплой поперечно-клиновой прокатки**

Последующая механическая обработка после теплой ПКП шарового пальца (рис. 1, а) сводится к сверлению отверстия, накатке резьбы на хвостовике и чистовой шлифовке сферы. Конус пальца при этом соответствует техническим требованиям по площади прилегания к контрольному калибру и чистоте поверхности (Ra 2,5) – дополнительной обработки не требуется. Коэффициент использования металла в этой технологии составил 0,91.

а

б

в

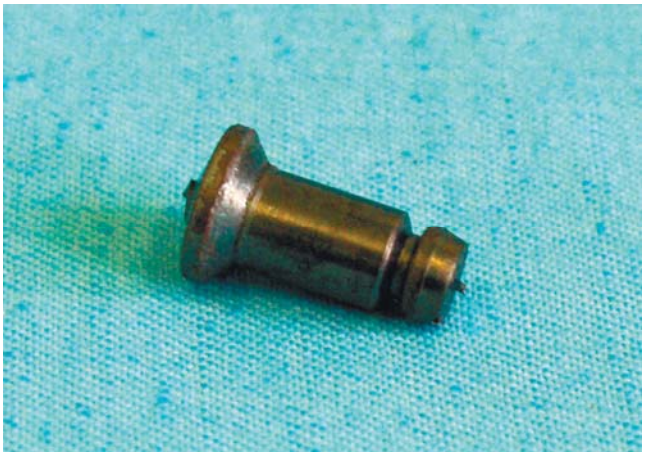
Рисунок 1 – Детали, изготовленные методом теплой ПКП

Деталь вал (рис. 1, б) имеет простую конфигурацию из цилиндров. Однако жесткий допуск в 0,06 мм на радиальное биение делает возможной прокатку такой детали только в теплую. Норма расхода металла снижается в 1,75 раза по сравнению с точением.

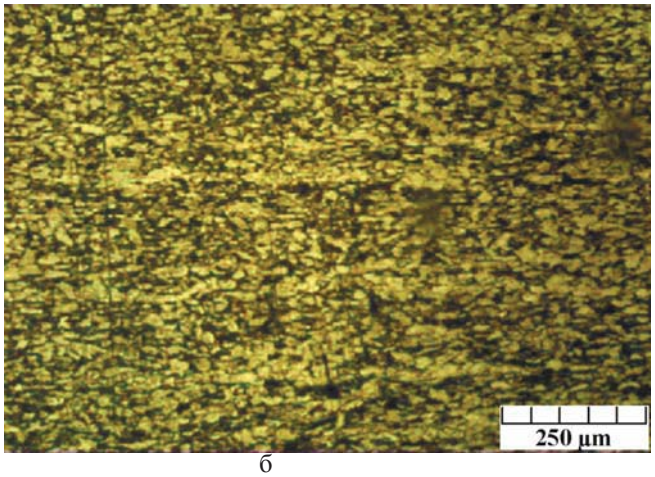
Деталь шарнир (рис. 1, в) имеет сложную поверхность, состоящую из малой и большей сфер, сопряженных галтелями, цилиндра с базовой опорной поверхностью и хвостовика под запрессовку. Перепад размеров по диаметрам – двойной. Как правило, такие детали получали исключительно на токарных автоматах с низкой производительностью и значительными отходами в виде стружки, а затем шлифовали. Время цикла (2 детали за один ход ползуна) при ПКП этой детали составляет 7 секунд. Шероховатость поверхностей сфер прокатанной детали –

Ra 2,5; точность размеров – менее 0,08 мм. Последующая обработка сводится к финишной шлифовке сфер. Норма расхода металла снижается в 1,7 раза.

Поковка пальца трактора Минского тракторного завода (МТЗ) (рис. 2, а) изготавливается методом теплой ПКП. Структура металла на оси этой поковки показана на рис. 2, б. Структура сфероидизирована. Зерна слегка вытянуты в направлении оси детали. Размер зерна перлитных колоний ~200 ÷ 250 мкм в длину и ~50 ÷ 100 мкм в поперечнике. Пластические свойства стали выше, чем при горячей прокатке с печным нагревом. Прокатка ведется при температуре, когда идет фазовое эвтектоидное превращение α↔γ, что инициирует процесс получения сфероидизированных эвтектоидных составляющих с более высокими характеристиками механических свойств.



а




б

Рисунок 2 – Поковка (а) пальца трактора МТЗ, изготовленная методом теплой ПКП, и структура металла на оси (б) (температура прокатки 1020 К)

**Выводы**

Внедрение теплой ПКП для производства типовых деталей автомобилестроения экономически выгоднее традиционных технологий. Снижение температуры нагрева заготовок при ПКП в области теплых температур обработки 970 ÷ 1170 К вызывает увеличение энергии на формообразование и снижение энергии на нагрев. Общий баланс показывает экономию до 20 % электроэнергии, что позволяет отнести новые технологии теплой ПКП к энергосберегающим. Также снижение температуры прокатки позволяет получать изделия с повышенной для ПКП точностью диаметральных размеров, с шероховатостью поверхности до 0,6 Ra и повышенными прочностными характеристиками.

## Список литературы

1. *Щукин, В.Я.* Основы поперечно-клиновой прокатки / В.Я. Щукин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 223 с.

2. *Щукин, В.Я.* Новое в поперечно-клиновой прокатке / В.Я. Щукин, Г.В. Кожевникова, А.О. Рудович // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 3. – С. 35–37.

3. *Кожевникова, Г.В.* Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 291 с.

4. *Shchukin, V. Y.* Cross-wedge rolling at PTI NAS Belarus / V. Y. Shchukin, G. V. Kozhevnikova, V. V. Petrenko // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 201–202. – P. 1198–1202.

5. *Кожевникова, Г.В.* Построение эпюр контактных напряжений на границе инструмент–заготовка при поперечной прокатке / Г.В. Кожевникова // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 1. – С. 94–99.

6. *Kozhevnikova, G.* Cross-wedge rolling / G. Kozhevnikova. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2012. – 321 c.

7. *Çakırcalı, M.* Cross wedge rolling of a Ti6Al4V (ELI) alloy: the experimental studies and the finite element simulation of the deformation and failure / M. Çakırcalı, C. Kılıçaslan, M. Güden, E. Kıranlı, V.Y. Shchukin, V. V. Petronko // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 65, Issue 9-12. – pp 1273–1287.

8. Solid-state laser fusion of spherical titanium powders / K. E. Belyavin, D. V. Minko, O. O. Kuznechik et all / Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Springer New York. – 2008. – Vol. 47, No. 7-8. – pp. 500–505.

9. *Кожевникова, Г. В.* Условия устойчивого протекания поперечной и поперечно-клиновой прокаток // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2009. — № 1 (22). — С. 44–53.

# FEATURES OF WARM CROSS-WEDGE ROLLING

**Kozhevnikova G. V.**, C.Sc. (Engineering), Chief Researcher, e-mail: fti@tut.by

G.V. Kozhevnikova State Scientific Institution "The Physical Technical Institute of the National Academy of sciences of Belarus", 10 street Kuprevich, Minsk, 220141, Belarus

**Abstract:** Cross-wedge rolling with steel workpieces heating temperature up to 970 ÷ 1170 K increases significantly the quality of rolled items in comparison with hot rolling.

**Keywords:** Plastic deformation, Cross-Wedge Rolling, Plasticity Resource.

**УДК 539.375:621.77**

# ВЛИЯНИЕ ВАКУУМА НА СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕКОЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

*А. Н. КРУТИЛИН*
*Ю. Ю. ГУМИНСКИЙ*

Белорусский Национальный Технический Университет, Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65

**Аннотация:** В данной статье затрагивается тема вакуумного воздействия на литейные жидкостекольные стержневые и формовочные смеси. В ней описаны методы исследований и представлены основные результаты. Также предложены направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** жидкое стекло, жидкостекольные смеси, вакуум.

На современном этапе наибольшее распространение при изготовлении литейных форм и стержней получили процессы, основанные на использовании холоднотвердеющих смесей, в основном на основе синтетических смол или жидкого стекла. Сдерживающими факторами широкого использования жидкостекольных смесей являются повышенная хрупкость, затрудненная выбиваемость, трудности связанные с регенерацией смесей и т.д. Решение данной проблемы возможно за счет комплексного подхода, одновременного улучшения свойств жидкого стекла и обеспечения оптимальных режимов отверждения стержней и форм.

В связи с возрастающими требованиями к повышению качества отливок, обеспечения их размерной точности, необходимости снижения трудоемкости изготовления деталей, актуальность данного направления современной технологии изготовления отливок не вызывает сомнения.

Одним из наиболее интересных направлений, несомненно, имеющих практическую значимость, является использование вакуума при изготовлении форм и стержней из жидкостекольных смесей, для получения необходимых физико-механических и эксплуатационных свойств, при минимальном процентном содержании жидкого стекла в смеси.

Для изучения этого явления, совместно с лабораторией Электрофизики, в отделе «Пучковых и плазменных технологий» в ФТИ НАНБ проводили эксперименты по изучению влияния вакуума на жидкостекольные смеси в целом и на жидкое стекло в частности.

Состав жидкостекольной смеси во всех экспериментах: 100% кварцевый песок, и сверх 100% добавляли 4% натриевого жидкого стекла плотностью 1290 г\см$^3$.

На первом этапе образцы из жидкостекольной смеси помещали в камеру и выдерживали при одном и том же значении разряжения, однако, учитывая, что образцы «восьмерки» и «цилиндры» имеют разную массу, приняли решение за контролируемый параметр брать время работы вакуумного насоса.

Оснастка для получения образцов при продувке углекислым газом, которую использовали при проведении экспериментов, представлена на рис 1

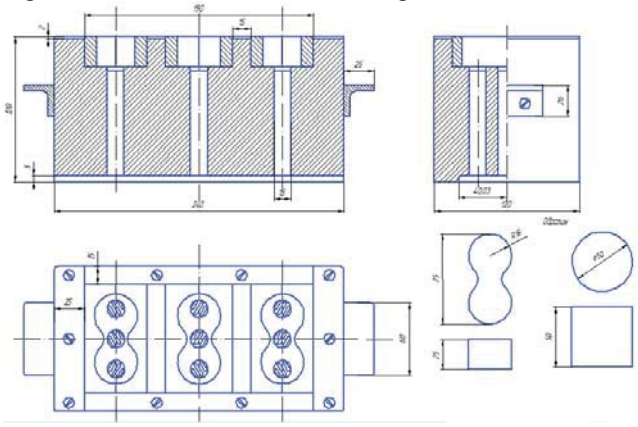


Рисунок 1 – Оснастка

Чертеж крышки для продувки газом представлен на рис 2.

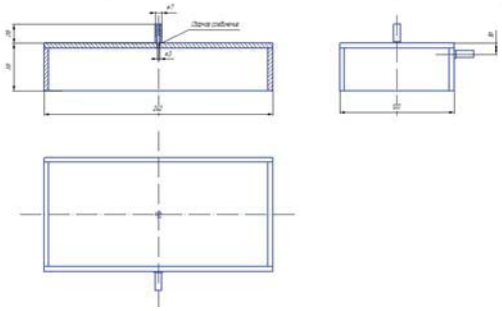


Рисунок 2 – Крышка для продувки газом $CO_2$

Сущность эксперимента заключалась в следующем (рис 3). Оснастку 2 с жидкостекольной смесью, помещали в вакуумную камеру. Сверху на оснастку для герметизации системы устанавливали крышку 1 с резиновой прокладкой. Крепление крышки осуществляли с помощью резьбового соединения.

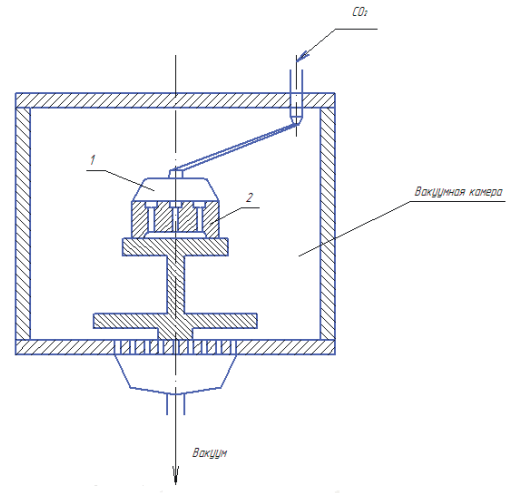



Рисунок 3 Схема проведения экспериментов
1 – Крышка (рис 2); 2 – Оснастка (рис 1)

На рисунке 4 представлена экспериментальная установка в сборе.

Рисунок 4 – Система в сборе

Экспериментальные исследования показали, что полученные образцы после помещения их в камеру при разряжении 0,18МПа и выдержке в течении 15 с с последующей продувкой $CO_2$

получились хрупкими и рассыпались практически сразу после извлечения из оснастки. При предварительной продувке газом $CO_2$ и последующей выдержке в камере прочность образцов оказалась еще ниже.

В процессе проведения экспериментов был замечен интересный факт, что использование только одного вакуума оказывает заметное влияние на прочность образцов.

Наибольшую прочность имели образцы смеси, которые предварительно выдерживали в вакууме в течение 10 минут, после чего извлекали из вакуумной камеры и продували углекислым газом, в течение 10 с при давлении 0,1 МПа.

Известно, что жидкостекольные смеси отверждаются на воздухе, что связано с содержанием в воздухе газа $CO_2$. При создании разряжения в вакуумной камере происходит удаление воздуха и влаги из смеси, последующая продувка $CO_2$ способствует быстрому заполнению капилляров углекислым газом.

В таблице 1 представлены экспериментальные данные по влиянию времени выдержки образцов при разряжении на прочность, газопроницаемость и осыпаемость образцов.

Таблица 1 – Результаты экспериментов при различном времени работы насоса

| Время работы насоса | Прочность, МПа | Газопроницамость, ед | Осыпаемость, % |
|---|---|---|---|
| 10 | 0,33 | 257 | 0,5 |
| 15 | 0,23 | 257 | 0,4 |
| 20 | 0,27 | 275 | 0,2 |

Так как прочность образцов не достигала уровня прочности при одном лишь вакуумном воздействии, в дальнейшем было решено провести серию экспериментов, в которых меняли последовательность подачи вакуума и углекислого газа. Варианты проведения экспериментов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Последовательность проведения экспериментов

| № эксперимента | Состав смеси | Последовательность действий |
|---|---|---|
| 1 | 100% кв. песок, 4% жидкое стекло, продувка углекислым газом 3 сек при показании манометра на выходе из редуктора 0,2МПа | 10 мин выдерживались образцы при рабочем вакуумном насосе, после чего не выключая насос, в разряжении, продувались образцы. |
| 2 | 100% кв. песок, 4% жидкое стекло, продувка углекислым газом 3 сек при показании манометра на выходе из редуктора 0,2МПа | В вакуумную камеру помещались образцы, и продувались углекислым газом, после чего включался вакуумный насос на 10 мин. |
| 3 | 100% кв. песок, 4% жидкое стекло. | Образцы помещались в вакуумную камеру и выдерживались там 10 мин при рабочем вакуумном насосе. |
| 4 | 100% кв. песок, 4% жидкое стекло, продувка углекислым газом 3 сек при показании манометра на выходе из редуктора 0,2МПа | Образцы продувались только углекислым газом |

Результаты проведенных экспериментов представлены в таблице 3

Таблица 3 – Результаты экспериментов

| № эксперименты | Прочность, МПа | Газопроницаемость, ед | Осыпаемость, % |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,15 | 198 | 0,3 |
| 2 | 0,10 | развалились | 34 |
| 3 | 0,31 | 247 | 0,4 |
| 4 | 0,4 | 297 | 8,4 |

Для более наглядного представления результаты экспериментов представлены на рисунках 5 – 7.

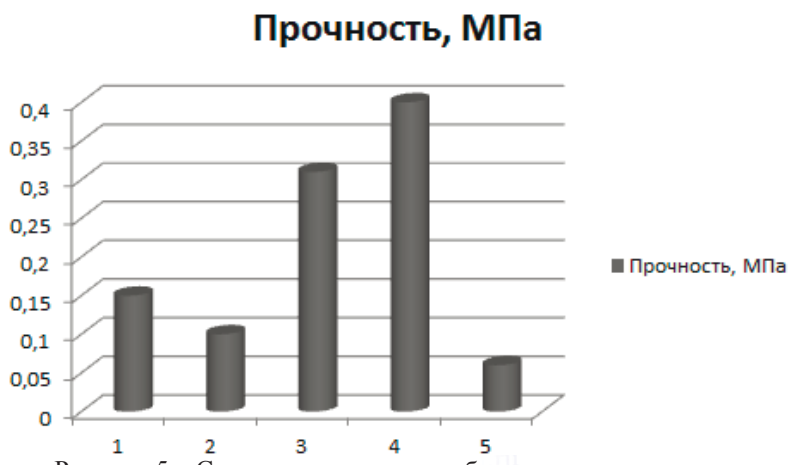



Рисунок 5 – Сравнение прочности образцов при растяжении

Рисунок 6 – Сравнение газопроницаемости образцов

Рисунок 7 – Сравнение осыпаемости образцов

Наибольшей прочностью и газопроницаемостью обладали образцы обработанные вакуумом и только с продувкой газом $CO_2$. Однако осыпаемость была на порядок меньше, когда образцы выдерживали только под вакуумом. Хорошие показатели были у образцов, которые сначала выдерживали в вакууме, а после продували газом $CO_2$. Избыточное количество углекислого газа разупрочняет смесь.

Невысокие показатели свойств смеси при совместном использовании вакуума и $CO_2$ газа, возможно, связаны с тем фактором, что при обработке $CO_2$ образуется $Na_2CO_3$, а процесс вакуумного воздействия схож с тепловой сушкой, где карбонат не образуется, отверждение происходит за счет удаления влаги из жидкого стекла.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показывают, что вакуумная

обработка оказывает влияние на формирование прочности жидкостекольных смесей. Определенный интерес представляет замена процесса отверждения жидкостекольных смесей тепловой сушкой и продувкой газом $CO_2$ на отверждение в вакууме. Такая технология позволит существенно сократить расходы на изготовление форм и стержней изготовленных из жидкостекольных смесей.

Исследования в данном направлении будут продолжены в направлении оптимизации выбора технологических параметров процесса, совершенствования используемой оснастки и оборудования.

## INFLUENCE OF VACUUM ON THE PROPERTIES OF CASTING MIXTURES WITH SODIUM SILICATE

**Krutilin A. N.,**
**Huminski Yu. Yu.**

Belarusian National Technical University, Belarus, 220013, Minsk, Nezavisimosty Ave., 65,
kant-minsk@tut.by, guminskiy1988@gmail.com

**Abstract:** In this article main theme about vacuum effect on the properties casting mixtures with sodium silicate. In it described methods of research and main results of experiments. And propose ways of future research.

**Keywords:** liquid glass liquid glass mixture vacuum.

**УДК 539.375:621.77**

# ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА ЛИТОЙ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

*Е. О. ОЛЬХОВИК, канд. техн. наук, доцент*

ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
olhovick@gmail.com(orcid.org/0000-0001-9305-0784, ResearcherID: I-4993-2013)

**Аннотация:** В статье рассмотрено современное состояние задачи оптимизации проектирования технологии для изготовления стальных отливок ответственного и особо ответственного назначения. Приводится обзор моделей компьютерного анализа литейных технологий, обеспечивающих выявление образования дефектов литого металла. Рассмотрены варианты использования целевых функций различного типа для выполнения геометрической и топологической оптимизации, как самой конструкции литой детали, так и элементов литейной технологии. Выделены основные перспективные направления для проведения дальнейших исследований. Приведены результаты расчетов для отливки корпуса запорной (обратной) арматуры общепромышленного и судового назначения. При этом в качестве целевой функции предлагается использовать параметры напряженно-деформированного состояния. В предлагаемом варианте топологическая оптимизация ориентирована на жизненный цикл литой детали, что обеспечивает более высокую надежность и долговечность.

**Ключевые слова:** Стальные отливки, топологическая оптимизация, трубопроводная арматура, литейная технология, жизненный цикл.

**Введение.** Изготовление стальных отливок ответственного назначения со стабильными механическими характеристиками хорошо известная научно-техническая проблема. Здесь в качестве отдельной задачи можно выделить разработку методов направленного формирования эксплуатационных (служебных) характеристик литых деталей. Решение данной задачи позволит в значительной мере расширить необходимую информацию о жизненном цикле отливки и принять необходимые мероприятия для оптимизации конструкторско-технологической части. В современной постановке данное решение связано с системами компьютерного анализа и моделирования технологических процессов литейного производства. Здесь главным направлением сохраняется точный анализ применяемых технологических решений, обеспечивающих формирование качественного металла отливок.

Существующие методы моделирования литейных технологий предполагают только ее детальный анализ, по результатам которого выполняется доработка средств технологического обеспечения качества. В последние годы возник новый класс задач, связанных с автоматизацией процесса разработки технологии, где в качестве основного метода используются принципы геометрической и топологической оптимизации конструкции детали. В данной статье предлагается анализ задачи по топологической оптимизации литейных технологий.

**Современное состояние вопроса исследования.** Большинство исследований, связанных с геометрической или топологической оптимизацией конструкций высоконагруженных деталей основано на анализе максимальной статической нагрузки. При этом, результатом оптимизации является, как правило пошаговое удаление объемов материала конструкции, имеющих наибольшие коэффициенты запаса статической прочности. В несколько проходов (расчетных итераций) производится постепенное изменение геометрии детали, при этом результаты каждого шага сравниваются с предыдущим до момента достижения приемлемого результата.

Для оптимизации литейных технологий задача усложняется тем, что в технологической цепочке производства участвует уже группа материалов (литой металл, литейная форма, стержень и др. вспомогательные материалы). Также, геометрическая оптимизация литейной технологии осложняется выбором целевой функции, поскольку их может быть несколько, в зависимости от поставленной задачи.

В работе [1] авторы приводят достаточно полный научный обзор методов топологической оптимизации различных конструкций, при этом выделяют четыре основных метода оптимизации, основанных на анализе: равномерности напряженно-деформированного состояния, граничных условий (метод вариации границ), формы конструкции (структурный или геометрический метод).

Вновь разрабатываемые методы топологической оптимизации [2-4] основаны на выборе комплекса целевых функций (многопараметрическая оптимизация) для решения сразу связанного набора задач, например повышение жест-

кости при определенном соблюдении баланса площади поперечных сечений детали и т.п.

В работе [5] предложены методы оптимизации литниково-питающей системы для повышения качества отливок и снижения объема дефектов. В качестве целевой функции была выбрана зависимость объемной усадки от условий затвердевания металла в форме. С использованием профессионального программного обеспечения были исследованы гидродинамические особенности заполнения литейной формы, смоделирован процесс формирования усадочной пористости, как наиболее распространенным дефект, возникающий вследствие неправильного проектирования литниковой системы. В качестве решения авторы предложили оптимизированную систему питания отливки, которая на практике позволила уменьшить объем пористости и снизить процент брака.

В работе [6] автор приводит сравнительный анализ программных продуктов (MAGMASoft (ФРГ), ProCAST (США, Швейцария), FLOW-3D (США), WinCAST (ФРГ), Poligon (Россия), LVMFlow (Россия)), т.е. наиболее распространенных на промышленных предприятиях Российской Федерации.

В работе [7] раскрыты возможности программного комплекса CastDesigner (разработанного в МГТУ им.Н.Э.Баумана), предназначенного для конструирования технологичных по питанию стальных отливок.

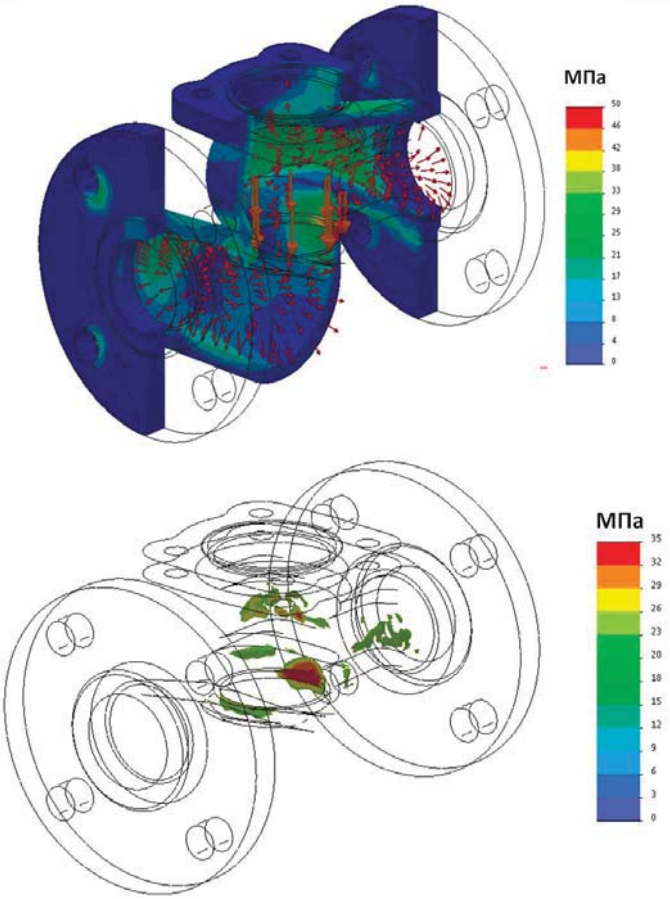
В работе [8] выполнен анализ существующих математических моделей литейных процессов на предмет наиболее полного учета всех производственных факторов. Сформулированы рекомендации конструктору и технологу для выбора оптимальной математической модели.

Авторы [9] применил на практике методы топологической оптимизации рычага подвески грузового автомобиля, при этом был, достигнут результат в виде снижения массы изделия.

В цикле работ [10-11] нами были предложены собственные разработки в области геометрической оптимизации стальных отливок ответственного назначения, при этом в качестве целевой функции было предложено использование локального параметра[10] направленности затвердевания, отвечающего за формирование плотного строения металла отливки. Для реализации расчетов было разработано специальное программное обеспечение[12-14], основанное на применении метода конечных элементов.

**Постановка и методы решения задачи.** Основным направлением последних исследований является применение технологии топологической оптимизации с учетом всего жизненного цикла. Общая задача представляет собой синтез двух решений: оптимизация литейной технологии и повышение общей конструктивной прочности изделия[15]. Такая связка необходима для направленного формирования высоких эксплуатационных (механических) свойств металла в отливке, за счет того что литейная технология разрабатывается не только для обеспечения общих требований по качеству и отсутствию дефектов, но и для создания более оптимальной конструкции[16] с точки зрения сопротивлению внешним нагрузкам и усталости.

В качестве объекта для исследований нами был рассмотрен корпус судовой запорной (обратной) арматуры, расчетное напряженно-деформированное состояние которого приведено на рис.1(а). Здесь в качестве внешних нагрузок было задано рабочее гидростатическое давление и усилие в запорном узле («золотник»-«седло»). В открытом состоянии клапана, его корпус имеет избыточно высокие коэффициенты запаса прочности стенок отливки, однако при его запирании возникает дополнительное осевое усилие(до 15кН) на седло, которое передается на сам корпус. В этом случае в локальной зоне присоединения выходного патрубка и центральной части корпуса возникает высокий уровень напряжений (рис.1(б).). Что при длительном воздействии приводит к постепенной деформации корпуса с дальнейшей разгерметизацией внутренней полости, поскольку за счет перекоса седла снижается усилие в запорном узле. Случаи образования трещин или разрушения корпуса также имеют место, но гораздо реже.




а) б)

Рисунок1 – Напряженно-деформированное состояние корпуса судовой запорной арматуры (внутреннее давление 4МПа и запирающее усилие на золотнике 15кН)

При разработке литейной технологии данному узлу уделяется внимание, прежде всего связанное с предупреждением образования горячих трещин на радиусном переходе. Недостатка питания рассматриваемого узла жидким металлом, как правило, не выявляется, поскольку всегда есть возможность увеличить литейный припуск на внутренний диаметр запорного седла, который подвергается механической обработке. Для оценки качества разработанной литейной технологии используется большая группа расчетных критериев, таких как: температурный градиент, скорость затвердевания, градиент продолжительности затвердевания, критерий Ниямы, критерий Хью, критерий дефицита питания и др. Все они отвечают за формирование дефектов литого металла различной физической сущности и могут использоваться в качестве целевой функции при оптимизации геометрии отливки.

**Обсуждение результатов.** Выполненный анализ температурных полей затвердевающего корпуса позволяет сформировать общее поле продолжительности затвердевания (время полного затвердевания каждого элемента (КЭ)) и распределение локального параметра[10,13] степени направленности затвердевания в отливке. Расчет локального параметра направленности затвердевания для каждого элемента (КЭ) дискретизации отливки выполняется по следующей формуле:

$$G = \frac{(\tau_2 - \tau_1)}{\Delta l \cdot \tau_1}, [1/M],$$

где $\tau_1, \tau_2$ - продолжительность затвердевания металла соответственно в исследуемой точке отливки и в точке, отстоящей на расстояние $\Delta l$ в направлении питания. Величина локального параметра направленности затвердевания в таком виде отражает качество питания элементов отливки, тогда распределение параметра направленности затвердевания является обратным аналогом распределения пористости металла в отливке. Значения параметра G[1/м], можно рассматривать, как некоторые уровни, каждый из которых определяет работу питающих каналов. Предыдущие исследования[8,10,11,15], а также литературные данные по исследованию образования усадочной пористости позволили выявить условия, позволяющие достичь высокой плотности стали в отливках с толщиной стенки

в пределах от 15 до 80мм. Таким условием является выполнение следующего соотношения: 10>**G**[1/м]>1. Для решения задачи топологической оптимизации литого корпуса арматуры параметр G[1/м] был использован в качестве целевой функции. Предварительно, после расчета напряженно-деформированного состояния проектируемой судовой арматуры уже были внесены изменения [17,18], влияющие на надежность, при этом не учитывались особенности литейной технологии производства корпуса.

При анализе отливки корпуса арматуры проводилось сравнение величины осевого параметра направленности затвердевания по слоям снизу вверх. При значениях параметра направленности затвердевания больше критической, назначение каких-либо средств управления затвердеванием не требуется. В случае обнаружения локального параметра затвердевания ниже критического уровня назначался литейный напуск на этом уровне (диаметр запорного седла) в виде изменения индекса принадлежности элемента принадлежащего форме, на индекс, принадлежащий металлу. Таким образом, происходит местное увеличение толщины стенки отливки. В следующем по высоте слое, если имеется низкая величина параметра направленности затвердевания, автоматически происходит такое же увеличение толщины стенки отливки. Такой проход, снизу доверху, и назначение местного увеличения толщины отливки, позволяет поэтапно создать режим направленного затвердевания. При каждой итерации на отдельном слое отливки изменяется только один индекс принадлежности элемента к тому или иному материалу участвующему в теплообмене между металлом и формой. Такое изменение теплообмена, в свою очередь вызывает изменение положения расчетных термических осей и градиентов параметра направленности затвердевания. Циклическое выполнение описанных итераций, с промежуточным расчетом температурных полей, поля продолжительности затвердевания и поля локального параметра (G) направленности затвердевания происходит до тех пор, пока в теле отливки все элементы будут иметь необходимый уровень параметра направленности затвердевания.

В дальнейшем, полученные данные о снижении механических свойств используются для уточненного расчета[19] напряженно-деформированного состояния исследуемых деталей. Справочные и постоянные значения параметров прочности, при расчетах заменяются с учетом полученных зависимостей об их снижении, таким образом, появляется возможность учитывать влияние внесенных технологических дефектов на конструктивную прочность литых деталей.

**Выводы.** В данной статье рассматриваются некоторые проблемы, связанные с использованием методов топологической оптимизации при конструировании высоконагруженных корпусных деталей и при разработке их литейных технологий. Предлагаемая в статье процедура топологической оптимизации конструкции отливки может выполняться на стадии предварительного проектирования, когда окончательная геометрия и форма детали еще полностью не сформирована. Тогда, возможно использовать ограничения, которые относятся к процессу проектирования, касаются размеров, граничных условий, нагрузок и главное элементов технологической подготовки производства.

Предложенная методика позволяет разрабатывать литейные технологии с направленным формированием высоких механических свойств в локальных областях детали, подверженных наиболее высокой силовой нагрузке.

## Список литературы

1. *Deaton, J. D., & Grandhi, R. V.* (2014). A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. Structural and Multidisciplinary Optimization, 49(1), 1-38.

2. *Allaire, G., Jouve, F., & Michailidis, G.* (2013, March). Casting constraints in structural optimization via a level-set method. In 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization.

3. *Jain, A.*, "Design of an Aluminum Alloy Swingarm and its Weight minimization using Topology Optimization," SAE Technical Paper 2015-01-1356, 2015, doi:10.4271/2015-01-1356.

4. *Doctor, Y. N., Patil, B. T., & Darekar, A. M.* Review of Optimization Aspects for Casting Processes // International Journal of Science and Research (IJSR), Volume 4, Issue 3, March 2015, pp.2364-2368.

5. *Swapnil A. Ambekar and Dr. S. B. Jaju* "A Review on Optimization of Gating System for Reducing Defect" International Journal of Engineering Research and General Science Volume 2, Issue 1, January 2014, ISSN 2091-2730.

6. *Вольнов И.Н.* Системы автоматизированного моделирования литейных процессов–состояние, проблемы, перспективы // Литейщик России. – 2007. – №. 6. – С. 14-17.

7. *Поляков С., Куцый О.Я., Коротченко А.Ю. и др.* Компьютерное конструирование технологичных по питанию стальных отливок // Литейное производство. – 2014. – № 2 – С. 16-20.

8. *Десницкая Л. В., Ольховик Е.О. и др.* Проблемы моделирования литейных процессов //Литейное производство. – 2010. – №. 8. – С. 25-28.

9. *Вдовин Д.С., Котиев Г.О.* Топологическая оптимизация рычага подвески грузового автомобиля // Тракторы и сельхозмашины. 2014. №3. С. 20-23.

10. *Ольховик Е.О., Десницкий В.В.* Разработка методов автоматизированного проектирования литейной технологии изготовления отливок // Заготовительные производства в машиностроении – 2006 – №4 – С. 7-10.

11. *Ol'khovik, E.O., Desnitskii, V.V., Molchanyuk, R.A.* Interaction between casting and mold during solidification // Steel in Translation - Volume 37, Issue 5, May 2007, Pages 422-424. (DOI: 10.3103/S0967091207050051).

12. *Ольховик Е.О.* Программа для ЭВМ - «Подготовка составной конечно-элементной модели для моделирования задачи нестационарной теплопроводности методом контрольного объема» №2014662705 зарегистрирована 05.12.2014г.

13. *Ольховик Е.О.* Программа для ЭВМ - «Моделирование технологического процесса затвердевания металла отливки в форме» №2014662447 зарегистрирована 01.12.2014г.

14. *Ольховик Е.О.* Программа для ЭВМ - «Моделирование дендритной кристаллизации сплава железо-углерод методом фазового поля» №2015613657 зарегистрирована 20.03.2015г.

15. *Ольховик Е.О.* Разработка методов повышения качества эксплуатационных свойств судовой трубопроводной арматуры // Речной транспорт (XXI ВЕК) – 2013. – №5(64). – С. 61-63.

16. *Ольховик Е.О., Десницкий В.В.* Исследование влияния размерной точности отливки боковой рамы тележки грузового железнодорожного вагона на ее прочность // Вестник машиностроения – 2014. – №10 – С. 47-49.

17. *Ольховик Е.О., Резник Ю.А.* Разработка технологии лазерной сварки сильфонных сборок для судовой трубопроводной арматуры // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова – 2014. – №3(25) – С. 119-122.

18. *Хмелевская В.Б., Мосейко Е.С., Ольховик Е.О.* Исследование упрочнения деталей судового валопровода методом покрытия плазменным напылением с ультразвуковой обработкой // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова – 2013. – №3(19) – С. 81-87.

19. *Ol'khovik E.O.* Development process design with effects of technology quality // Applied Mechanics and Materials - Vol.770 (2015) pp.419-423. (DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.770.419).

## TOPOLOGY OPTIMIZATION DESIGN HOUSING CAST STOP VALVES

**Ol'khovik E. O.**, PhD, Ass. Prof.

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
Russia, 198035, Saint-Petersburg, Dvinskaya str.5/7
olhovick@gmail.com (orcid.org/0000-0001-9305-0784, ResearcherID: I-4993-2013)

**Abstract**: The article deals current state of the optimization problem of designing technologies for the manufacture of steel castings responsible and highly critical applications. Reviewed the models of computer analysis of casting technologies for the identification of defects of cast metal. Reviewed the variants of using objective functions to perform various types of geometric and topological optimization of both the design of cast parts and components casting technology. We consider the basic perspective directions for further research. The calculation results for the casting or stop (return) valves for general and marine applications. With this as the objective function it is proposed to use the parameters of the stress-strain state. In the present embodiment, the topological optimization focused on the life cycle of the molded part, which provides higher reliability and durability.

**Keywords:** Steel castings, topological optimization, stop valve, foundry technology, life cycle.

**УДК 621.793.7**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ ЗАМЕНЫ ХРОМИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА НАПЫЛЕННЫЕ ДЕТОНАЦИОННЫМ СПОСОБОМ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ $AL_2O_3$

*А. Н. СМИРНОВ[1], доктор техн. наук, профессор*
*В. Л. КНЯЗЬКОВ[1], канд. техн. наук, доцент*
*Е. Е. ПЕТРОВА[1], старший преподаватель*
*О. С. НАЗАРОВ[2], инженер-технолог*
*([1]КузГТУ, г. Кемерово, Россия, [2]ООО "НПЦ ГМИК", г. Междуреченск, Россия)*

Петрова Е. Е. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
e-mail: petrova.lena-petrova2010@yandex.ru

**Аннотация**: В статье рассмотрен процесс детонационного напыления деталей машин с целью определения возможности замены процесса хромирования, который вследствие, токсичности применяемых реагентов и отходов процесса, находится под строгим регулированием. Целью работы является исследование свойств модифицированных антифрикционных, коррозионностойких и износостойких свойств покрытий, полученных в процессе детонационного напыления смесями порошков ПР-БрАЖ9-4-3, наноразмерным $Al_2O_3$ и ПГ-СР4 и сравнение с известными свойствами хромированных покрытий.

**Ключевые слова:** хромирование, детонационное напыление, наноразмерные частицы, микротвердость.

**Введение**

Хромированные покрытия, как известно, обладают коррозионностойкими, износостойкими и антифрикционными свойствами. Твердость хромированных покрытий может достигать 65 HRC [1]. Основным недостатком процесса хромирования является то, что он находится под строгим регулированием, из-за реагентов и отходов, которые являются чрезвычайно токсичными, поэтому в настоящей работе показаны свойства покрытий полученных альтернативным хромированию, способом детонационного напыления. В качестве основы покрытий, использованы порошки ПР-БрАЖ9-4-3 и ПГ-СР4, модифицированные наноразмерными частицами $Al_2O_3$, которые обладают высокой твердостью и повышенными антифрикционными свойствами.

В современных технологиях упрочнения и восстановления деталей машин широкое применение находит метод нанесения газотермических покрытий, что обусловлено высокими технико-экономическими, санитарно-гигиеническими и экологическими параметрами процесса.

Способ детонационного напыления относительно наплавки, металлизации, плазменного и др. процессов отличается высокой производительностью, возможностью нанесения покрытий по толщине сравнимых с хромированием. Покрытия, полученные детонационным способом, обладают высокими адгезионными свойствами, отсутствием перегрева и деформаций деталей, не снижают ее исходную усталостную прочность. К недостаткам этого способа следует отнести необходимость напыления припуска на последующую финишную обработку поверхности детали, невысокий коэффициент использования материалов, используемых для напыления покрытий, а также высокий уровень шума.

Большое влияние на строение и свойства покрытий оказывают режимы процесса детонационного напыления, такие как, скорость полета и температура частиц, время пребывания их в химически активной среде, а также состав композиционной смеси порошков. Повышение скорости напыляемых частиц увеличивает запас их кинетической энергии [1] и обеспечивает высокие адгезионные свойства.

При детонационном нанесении покрытий, из-за циклического характера процесса, температура нагрева детали, как правило, ниже уровня структурных изменений, прочность сцепления напыленного слоя может достигать 200-240 МПа [1 – 2].

Гипотеза заключается в том, что высокие свойства покрытий могут быть достигнуты при детонационном напылении композиционной смеси порошков ПГ-СР4, обладающим

высокими свойствами коррозионной стойкости, износостойкости, ПР-БрАЖ9-4-3, обладающим высокими антифрикционными свойствами и $Al_2O_3$, обладающим высокой твердостью и антифрикционными свойствами.

**Материалы и методики**

Для исследований было изготовлено 2 образца из стали 20. С целью обеспечения высоких адгезионных свойств, выполнено детонационное напыление подслоя композиционным порошком ВК-25, затем на подслой, тем же способом нанесены слои с модифицированными смесями порошков содержанием ПР-БрАЖ9-4-3 (фракция 20-40 мкм), $Al_2O_3$ и ПГ-СР4:

Образец №1: Бр.АЖ9-4– (50%), порошок ПГ-СР4 (50%), подслой ВК 25.

Образец №2: Бр.АЖ9-4 (50%) + $Al_2O_3$(25%), порошок ПГ-СР4 (25%), подслой ВК 25.

Детонационное напыление выполняли на автоматической установке «Обь» при следующих параметрах: давление воздуха 0,2 – 0,18 МПа, расход воздуха G<0,01 кг/с; давление кислорода 0,14 МПа, расход – <0,002 кг/с; давление ацетилен 0,135 МПа, расход - <0,001 кг/с; давление пропан-бутана 0,135 МПа, расход – <0,001 кг/с.

Состояние порошка $Al_2O_3$ перед применением исследовалось в лаборатории физики ГОУ ВПО Томского архитектурно-строительного университета методом просвечивающей электронной микроскопии с помощью угольных реплик. Просмотр угольных реплик, на которые осаждались исследуемые порошки, осуществлялся на электронном микроскопе ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ и рабочих увеличениях в колонне микроскопа от 25 000 до 80 000 крат.

Измерение микротвердости выполняли на приборе DuraScan-20 по ГОСТ 9450-76 вдавливанием наконечника (четырехугольной пирамидой с квадратным основанием) в трех позициях, в каждой позиции по 9 точек, под нагрузкой 0,1 кг приложенной в течение 15 с при увеличении 10 крат, схема и результаты измерений микротвердости представлены в работе.

**Результаты и обсуждения**

Основные характеристики наноразмерных частиц керамики $Al_2O_3$, представлены в таблице 1. Свойства порошка $Al_2O_3$ представлены в технических условиях [3].

Таблица 1 – Основные характеристики порошка $Al_2O_3$

| Наименование показателя | Норма для марки А |
|---|---|
| Внешний вид | Высокодисперсный порошок белого цвета |
| Структура кристалла | Бемит |
| Размер кристаллитов, Å, не более | 1 000 |
| Удельная специфическая поверхность, $м^2/г$, в пределах | 10 ÷ 400 |

Характеристики керамического порошка $Al_2O_3$ более подробно описаны в работе [4].

Схема измерения микротвердости представлена на рис. 1 и в таблице 2. Результаты измерений обработаны методами математической статистики.

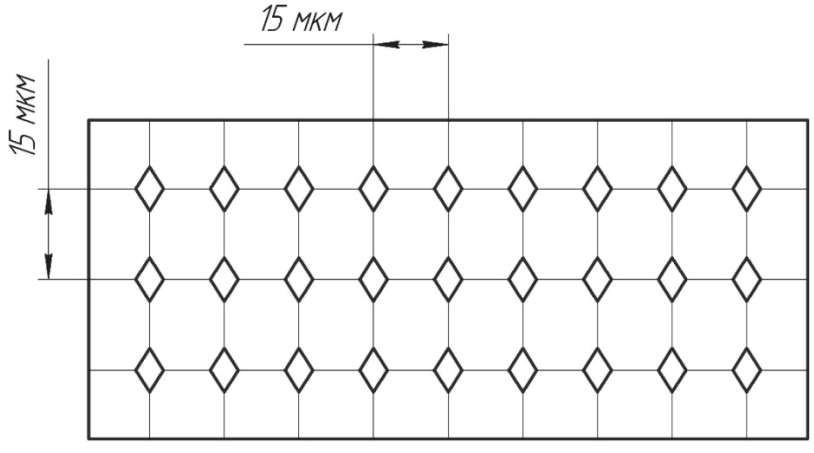



Рисунок 1 – Схема измерений микротвердости

Таблица 2 – Микротвердость поверхности напыленных образцов, HV (HRC)

МПа

| № | Позиции отпечатков | | | | | | | | | Среднее значение | Дисперсия |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | |
| 1 | 552 (56,5) | 993(>68,0) | 965(>68,0) | 696 (59,8) | 889 (66,9) | 639 (57,2) | 858 (65,7) | 913 (67,2) | 544 (52,0) | 783,2 | ~155,9 |
| | 794 (63,9) | 984(>68,0) | 457 (45,8) | 518 (50,3) | 560 (53,0) | 603 (55,3) | 664 (55,3) | 498 (49,0) | 644 (57,6) | 635,8 | ~120,6 |
| | 615 (56,0) | 984(>68,0) | 734 (61,5) | 522 (50,8) | 749 (62,0) | 930 (67,7) | 1012(>68,0) | 589 (54,8) | 729 61,5) | 762,7 | ~141,8 |
| 2 | 319 (32,1) | 401 (40,9) | 421 (42,8) | 359 (36,4) | 625 (56,5) | 446 (44,8) | 295 (29,2) | 589 (54,6) | 518 (50,3) | 441,4 | 91,6 |
| | 305 (30,4) | 309 (30,9) | 706 (60,2) | 850 (65,5) | 443 (45,0) | 897 (66,8) | 434 (44,0) | 446 (45,0) | 634 (57,1) | 558,2 | 189,8 |
| | 431 (43,7) | 485 (48,0) | 416 (42,0) | 630 (56,8) | 487 (48,0) | 548 (52,0) | 913 (67,2) | 287 (28,3) | 761 (62,6) | 550,9 | 144,7 |

Ниже приведен (рис. 2) график отображающий среднее значение полученных результатов микротвердости, в зависимости от состава смеси порошков.

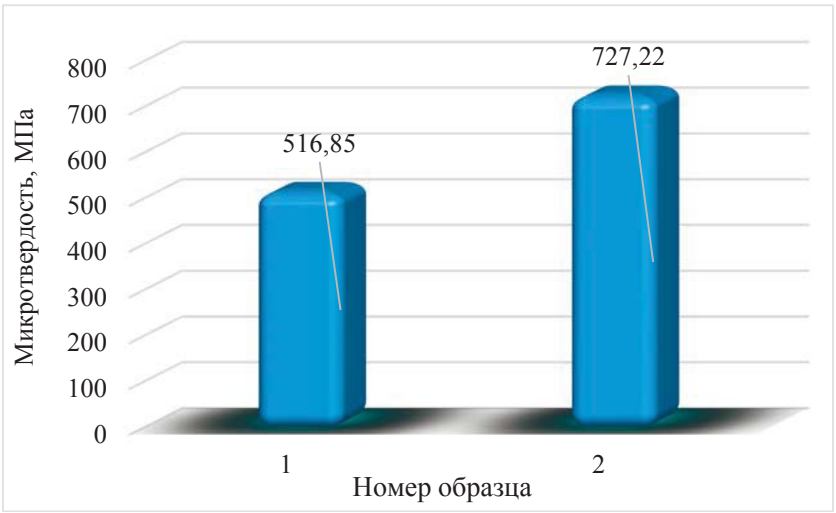



Рисунок 2 – Относительное изменение средней микротвердости поверхностного слоя напыленных образцов

Следует отметить, что полученные результаты характеризуются более высоким разбросом значений твердости поверхности покрытия, однако среднее значение твердости аналогично хромированному покрытию

**Выводы**

1. Применение способа детонационного напыления композиционных смесей порошков ПР-БрАЖ9-4-3+$Al_2O_3$ и ПГ-СР4 с подслоем ВК-25, обеспечивает твердость покрытий (от 52 до 68,0 HRC), которые близки значениям твердости хромированных покрытий (65 HRC).

2. Необходимо совершенствовать технологию получения композиционной смеси ПР-БрАЖ9-4-3+$Al_2O_3$ и ПГ-СР4 с целью получения более однородных по составу и свойствам покрытий и проведения исследования показателей твердости, износостойкости, коррозионной стойкости и антифрикционных свойств покрытия.

## Список литературы

1. Восстановление деталей машин: Справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов, В. М. Константинов – М.: Машиностроение, 2003. – С. 366-367.

2. Бартенев, С. С. Детонационные покрытия в машиностроении - Ленинград: Машиностроение. - 1982. - 215 с.

3. ТУ 2133-001-76634032-2006. Алюминия оксигидроокись (бемит). – М.:АЛЮМ-Э, 2006. – 18 с.

4. Смирнов, А. Н. Экспертиза промышленной безопасности в Сибирском регионе. – М.: Машиностроение, 2015. – С. 192-198.

# RESEARCH OF PERSPECTIVE WAYS TO REPLACE CHROME COATINGS WITH DETONATION SPRAYING METHOD MODIFIED WITH NANOSIZED PARTICLES $AL_2O_3$

**Smirnov A. N.**[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: galvas.kem@gmail.com
**Knjaz'kov V. L.**[1], C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: vntk50@mail.ru
**Petrova E. E.**[1], senior lecturer, e-mail: petrova.lena-petrova2010@yandex.ru
**Nazarov O. S.** [2], process engineer, e-mail: Nazarov17111975@mail.ru

[1] T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation
[2]RESEARCH AND PRODUCTION CENTER "MINING MACHINES, INNOVATIONS, CONSTRUCTION", Mezhdurechensk, 652870, Russian Federation

**Abstract**: This article describes the process of detonation spraying of machine parts in order to determine the possibility of replacing the chromium-plating process, which due to the toxicity of reagents and waste of the process is under strict regulation. The aim of the work is to study the properties of modification antifrictional and wear resistant, corrosion-resistant properties of coatings, obtained in the process of detonation spraying with mixtures of powders PR-BrAЂ9-4-3, nanoscale $Al_2O_3$ and PG-SR4 and comparison with known properties, of chrome platings.

**Keywords:** Chrome plating, detonation spraying, nano-sized particles, microhardness.

**УДК 621.762.4:621.983.044**

# РАСЧЕТ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ШТАМПОВКИ ПЛОСКИХ ЗАГОТОВОК

*Н. Е. ПРОСКУРЯКОВ[1], доктор техн. наук, профессор*
*А.В. ВОЛОДИН[1], аспирант*
*ЛАЙ ДАНГ ЗАНГ[2], канд. техн. наук, доцент,*
*([1]ТулГУ, г. Тула, Россия, [2]Университет Ле Куи Дон, Ханой, Вьетнам)*

Проскуряков Н.Е. - 300012, Тула, проспект Ленина, 92,
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», e-mail: vippne@mail.ru
Лай Данг Занг - Ханой, Вьетнам Университет Ле Куи Дон,
e-mail: danggiang248@mail.ru

**Аннотация:** При проектировании технологических операций электромагнитной штамповки плоских заготовок необходимо выбирать энергоэффективные режимы работы и параметры магнитно-импульсных установок. Предложен вариант расчета параметров технологических операций и оборудования.

**Ключевые слова:** электромагнитная штамповка, плоские заготовки, магнитно-импульсная установка, технологические параметры, концентратор, индукторная система

Электромагнитная штамповка (ЭМШ) представляет собой сложное явление, в котором происходят взаимосвязанные электромагнитные и механические процессы. Поэтому необходим совместный метод расчета электромагнитной и механической составляющих процесса.

При проектировании технологического процесса целесообразно произвести расчеты для ряда технологических параметров, чтобы оценить допустимую величину отступления от минимального по энергии зарядки режима.

В работе[ 1 ], показано, что давление импульсного магнитного поля (ИМП) при постоянной энергии зарядки магнитно-импульсной установки (МИУ) является функцией частоты разряда, зависящем от параметров МИУ, индуктора и заготовки. Изменение давления ИМП во времени можно представить выражением:

$$p(t) = p_0\, e^{-2\beta t} \sin^2 \omega_p\, t\,,$$

где $t$ - время, $\omega_p$ - круговая рабочая частота разряда, $\beta = R/(2L)$ - коэффициент затухания колебаний, $L, R$ - индуктивность и активное сопротивление разрядного контура; $p_0$ - условное давление ИМП при $t = 0$.

На ослабление давления ИМП при штамповке оказывают влияние перемещение заготовки и изменение ее геометрии в процессе обработки. Ю.А. Поповым предложена зависимость, позволяющая частично учесть эти изменения [ 2 ]:

$$p(t) = p_0 \frac{\Delta_Э}{\Delta_Э + u} e^{-2\beta t} \sin^2 \omega_p\, t$$

где $\Delta_Э$ - первоначальный эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой; $u$ - перемещение заготовки в процессе штамповки.

При плоской штамповке широко применяются индукторы с концентраторами магнитного поля. В отличие от конструкций концентратора для обжима и раздачи ИМП, рабочей частью индукторной системы для плоской штамповки является торцовая зона, что обусловливает некоторые конструктивные особенности данного устройства, показанного на рис. 1.

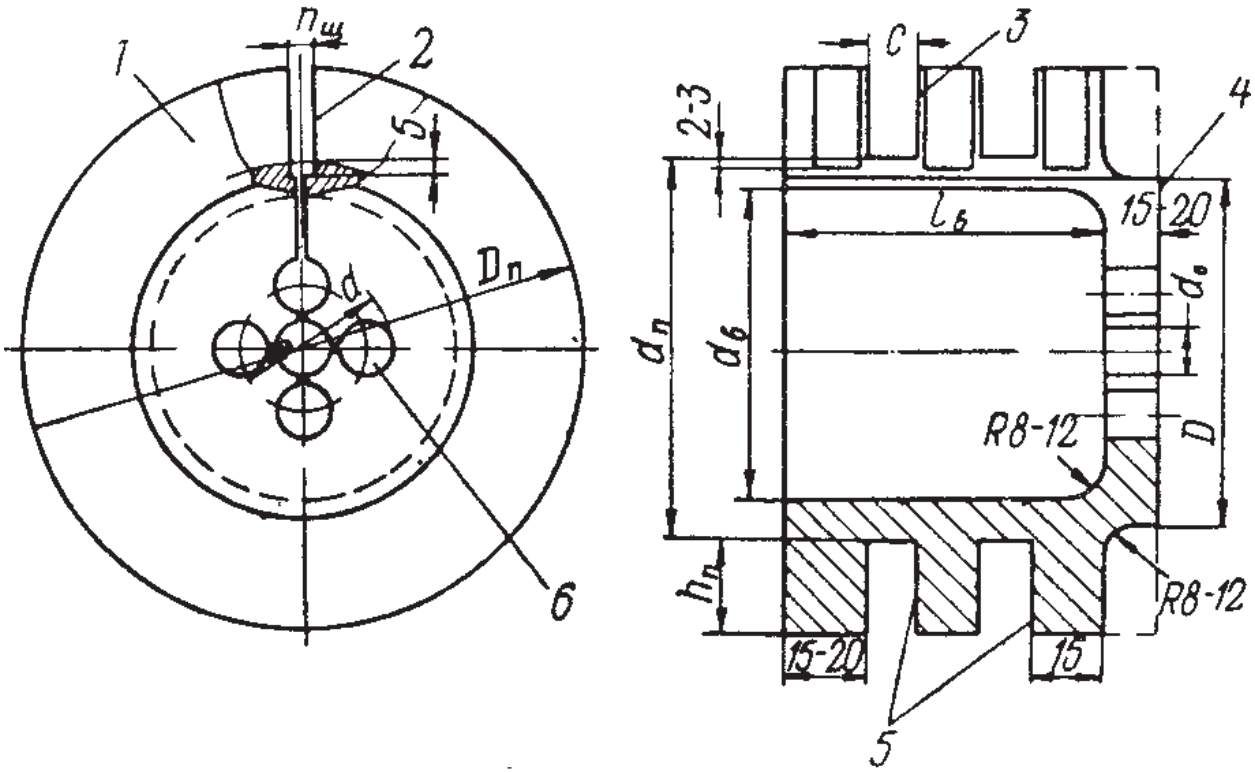



Рисунок 1 –Конструкция индукторной системы для плоской штамповки:
1- концентратор, 2 - радиальный разрез, 3- экранные вставки,
4- рабочая торцовая поверхность, 5- кольцевые пазы для витков индуктора, 6 - согласующие отверстия

Обычно в практике конструирования индуктора выполняется пять согласующих отверстий (рис. 1). Размер разреза, соединяющего отверстия, зависит от диаметра рабочей зоны $D$ и колеблется от 2 до 10 мм.

Диаметр внутренней полости концентратора в зависимости от внутреннего диаметра пазов, $d_П$ принимают

$$d_B = d_П - (20 \div 30) \text{ мм.}$$

Далее рассмотрим расчет типовой индукторной системы.

Исходные данные: материал заготовки – плотность $\rho_M$, его удельное электрическое сопротивление $\rho_З$; диаметр заготовки $d_З$, скорость встречи заготовки с матрицей $v_M$; МИУ – емкость блока конденсаторов $C_0$, собственная индуктивность $L_0$.

Примерный алгоритм расчета приведен ниже. Определяем:

1. $\Delta_u$ и $\Delta_З$ - глубины проникновения ИМП в индуктор и заготовку

2. $\Delta_Э$ - эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой

3. $\omega_p$ - рабочую круговую частоту разряда,

$$\omega_P = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - \eta_M},$$

где $\eta_M$ - коэффициент, характеризующий передачу магнитной энергии в систему индуктор-заготовка, $\eta_M = 0{,}8 - 0{,}9$; $\omega_0$ - собственная круговая частота разрядного контура МИУ.

4. $d_0$ - диаметр отверстий в центральной зоне (отверстия 6 на рис. 1), задаваясь изоляционным зазором $h_B$ (обычно 1...1,5 мм), $d_0 \geq \sqrt{4\,D\,h_B / n_0}$,

где $n_0$ - число отверстий, $D$ - раборчий диаметр индуктора – см. рис. 1.

5. $d$ - расчетный диаметр рабочей зоны, $d = 3d_0 + (2{,}5 \div 10)$ мм.

6. $I_m$ - амплитуда тока в рабочей зоне:

$$I_m = \sqrt{v_M \cdot \ln\frac{D}{d} \cdot \rho_M \cdot a_З \cdot D^2 \cdot \omega_p / (2\pi \cdot \mu_0 \cdot e^{-\alpha\pi})},$$

В предварительных расчетах принимают $\alpha = 0{,}2 \div 0{,}3$.

7. $\Delta h_B$ - расстояние между матрицей и заготовкой, при котором скорость их встречи максимальна

$$\Delta h_B = \mu_0\, I_m^2\, e^{-\alpha\pi}\, \pi / (\ln\frac{D}{d}\, \rho_З\, a_З\, D^2\, \omega_p^2)$$

8. $H_{mp}$ - максимальная напряженность поля в рабочей зоне

$$H_{mp} = 2I_m /(d\ln(D/d)).$$

9. $L_{u-з}$ - эквивалентная индуктивность индуктор – заготовка:

$$L_{u-з} = \frac{2\pi\mu_0}{\ln(D/d)}(h_B + \frac{\Delta_З + \Delta_u}{2}),$$

10. $L_{ЭИ}$ - эквивалентная индуктивность системы МИУ - индуктор

$$L_{ЭИ} = 1/(\omega_p^2 C_0) - L_0.$$

11. $W_{р.з}$ - энергия ИМП в рабочей зоне:

$$W_{р.з} = I_m^2\ L_{из}/2.$$

12. $W_H$ - энергия зарядки емкостного накопителя

$$W_H = W_{р.з}/(\eta_y\,\eta_K\,\eta_ц)$$

В предварительных расчетах принимаем: $\eta_y = 0{,}9$, $\eta_K = 0{,}4...0{,}5$, $\eta_ц = 0{,}8...0{,}9$.

13. $I_{OM}$ - Амплитуда разрядного тока по формуле

$$I_{OM} = \sqrt{2\,W_H/(L_{ЭИ} + L_0)} = \sqrt{2\,\omega_p{}^2 \cdot C_0 \cdot W_H}$$

14. $U_{OM}$ - амплитуда разрядного напряжения

$$U_{OM} = \sqrt{2W_H / C_0}$$

15. $\omega_П$ - Число витков индуктора в пазу концентратора

$$N_П = \frac{1}{n}\sqrt{\frac{L_{ЭИ}}{L_{ЭК}}}$$

где $n$ – число секций обмотки, включенных последовательно (обычно в концентраторах число витков в пазу не превышает 10…12 витков, в этом случае $n = 1$. Если $N_П > 12$, применяют последовательно-параллельное включение обмоток, при этом $n = 2$); $L_{ЭК}$ - эквивалентная индуктивность индуктора с учетом количества пазов и схемы соединения рабочей обмотки;

$$L_{ЭК} = \frac{L_{ЭП} \cdot n}{2\ m},$$

здесь $m$ - число групп последовательно включенных секций, соединенных параллельно; $L_{ЭП}$ - эквивалентная индуктивность одной половины паза, которая определяется как

$$L_{ЭП} = L_1^{'}\left[(1-k_П) + \frac{k_П \cdot (1-k_П) \cdot L_{n1} + 2 \cdot p \cdot k_П L_{ЭР}}{L_{n1} + 2 \cdot p \cdot L_{ЭР}}\right];$$

здесь $k_П = \frac{M_1^{'}}{\sqrt{L_1^{'} \cdot L_{n1}}}$ - коэффициент связи рабочей обмотки и стенки паза; $p = m \cdot n$ - число пазов концентратора; $L_1^{'}$, $L_{n1}$ - соответственно индуктивность поверхностей рабочей обмотки и стенки паза; $M_1^{'}$ - взаимная индуктивность между указанными поверхностями.

16. Определим $p$ - число пазов концентратора

$$p = \frac{I_{OM}}{I_{OM.П}};$$

где $I_{OM.П}$ - ток в пазу; принимаем

$$I_{OM.П} = 25...35\ кА.$$

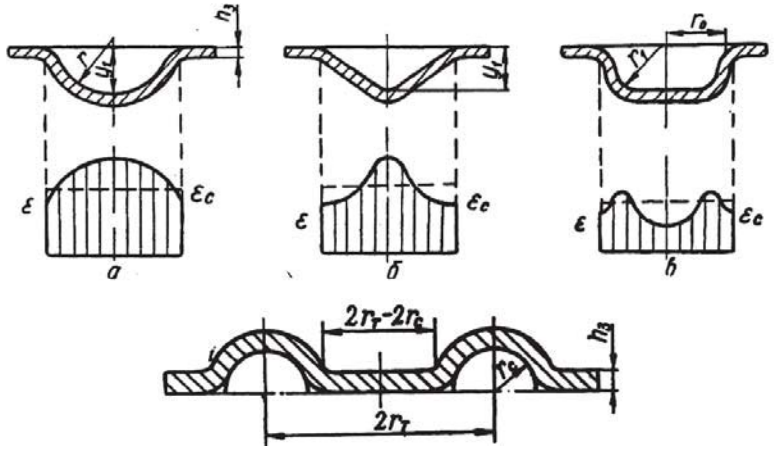



Рисунок 2 – Элементы формообразования для плоской ЭМШ:
а) сфера; б) коническое углубление; в) плоская формовка;
г) тороидальное сферическое углубление

Часто из расчета технологии при проектировании индукторных систем известна работа деформации заготовки. Тогда по заданному объему деформируемой части заготовки можно найти требуемую работу деформации:

$$A = a_y V_з.$$

Удельную работу деформации можно опре-

делить как [ 3 ]:

$$a_y = \frac{B}{1+m_M} \cdot \varepsilon^{1+m_M}$$

где $a_y$ — удельная работа деформации; $V_3$ — объем деформируемой части заготовки; $\varepsilon$ - интенсивность деформации; $B, m_M$ - механические характеристики штампуемых материалов.

При обработке листовых материалов часто пользуются средним значением интенсивности. Широко применяемые в операциях ЭМШ элементы формообразования представлены фигурами на рис. 2.

Значение средней интенсивности деформации для рассматриваемых элементов формообразования (размеры см. на рис. 2):

- сфера:

$$\varepsilon_C = \frac{\cos^{-1}(1-y/r)}{\sqrt{2y/r-(y/r)^2}};$$

- коническое углубление:

$$\varepsilon_C = \sqrt{1+(y/r_0)^2}-1;$$

- плоская формовка:

$$\varepsilon_C = (\pi/2-1)\, r_1/r_0;$$

- тороидальное сферическое углубление:

$$\varepsilon_C = (\pi-2)\, r_C/r_T.$$

Зная работу деформации, определяем энергию зарядки емкостного накопителя:

$$W_H = A/(\eta_y \eta_K \eta_u \cdot \eta_П),$$

где $\eta_П$ – механический коэффициент полезного действия, а остальные коэффициенты - см. п. 12 алгоритма.

Полученная в последней выражении энергия зарядки емкостного накопителя должна быть не меньше полученной ранее в п.12, иначе необходим перерасчет.

**Выводы:**

1. При расчете технологических параметров ЭМШ необходимо учитывать взаимосвязанные процессы - электромагнитный и механический.

2. Представленный алгоритмы расчета параметров плоской индукторной системы позволяет с достаточной для практики точностью произвести расчет энергоэффективности процесса ЭМШ.

## Список литературы

1. Магнитно-импульсная обработка металлов / Изд. 3-е доп.- Воронеж: ЭНИКМАШ, 1976.- 182 с.

2. *Попов Ю.А.* Некоторые особенности расчета процессов, использующих силовое воздействие импульсного магнитного поля // Электрофизические процессы при импульсном разряде (Чебоксары). - Вып. 4, 1977.- С. 84-104.

3. Магнитно-импульсная штамповка полых цилиндрических заготовок / А.К. Талалаев, С.П. Яковлев, В.Д. Кухарь, Н.Е. Проскуряков, Е.М. Селедкин, Ю.Г. Нечепуренко.– Под ред. А.К. Талалаева, С.П. Яковлева.- Тула: «Репроникс Лтд», 1998.- 238 с.

## CALCULATION OF ENERGY EFFICIENCY OF PROCESSES OF ELECTRO-MAGNETIC STAMPING OF FLAT BLANKS

**Proskuryakov N. E.**[1], D.Sc. (Engineering), Professor, vippne@mail.ru
**Volodin A. V.** [1], postgraduate, tppzi@tsu.tula.ru,
**Dang Lai Zhang**[2], C.Sc., Associate Professor, danggiang248@mail.ru,

[1]Tula State University, Lenin avenue, 92, Tula, 300012, Russian Federation
[2]Le Quy Don University, Hanoi, Vietnam

**Abstract:** When designing technological operations of electromagnetic forming of flat blanks need the right choice of energy-efficient operation modes and of parameters of magnetic-impulse equipments. The variants of engineering of the parameters of technological operations and equipment are offered.

**Keywords:** electromagnetic forming, flat bars, magnetic-impulse equipment, technological parameters, concentrator, the inductor system.

**УДК 621.771**

# ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВАЯ ПРОКАТКА ЗУБКОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ КОМБАЙНОВ

*В. Я. ЩУКИН*, *кандидат техн. наук*
(*ФТИ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь*)

220141, г. Минск, ул. Купревича, 10,
Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси»,
e-mail: fti@tut.by

**Аннотация:** Разработана технология поперечно-клиновой прокатки зубков горнодобывающих комбайнов для предприятий горного машиностроения. Рабочая часть зубка подвергается лазерному легированию непосредственно по прокатанной поверхности.

**Ключевые слова:** Поперечно-клиновая прокатка, зубки горнодобывающих комбайнов, лазерное упрочнение.

**Введение**

Главной причиной выхода из строя тяжелой горнодобывающей и обогатительной техники является коррозионно-абразивный износ механизмов вследствие эксплуатации в условиях коррозионных сред и высоких механических нагрузках. Непосредственно это относится к основному породоразрушающему элементу горнодобывающих машин – зубками типа РКС-1, Д6-22, SN-40 и др.

Накопленный в ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» опыт по изготовлению осесимметричных деталей методом поперечно-клиновой прокатки (ПКП) позволил при разработке соответствующего инструмента, прокатывать основные типы зубков горнодобывающих комбайнов с минимальным использованием токарной обработки. Данный метод является высокопроизводительным, и в сочетании с дополнительным лазерным упрочнением зубка позволил создать комплексный технологический процесс изготовления нового вида износостойкого инструмента [1, 2].

**Поперечно-клиновая прокатка зубков**

На рис. 1 показан зубок РКС1.00.00.111 (а) горнопроходческого комбайна и клиновой инструмент (б) для ее прокатки на стане ПКП. Заготовка диаметром 25 мм и длиной 230 мм из стали 35ХГСА нагревается ТВЧ до 1373 К и подается на лоток 2 до упора 1. Деформирующим клином 3 на заготовке прокатываются конусные части зубка до диаметра 14 мм. Дорожки 4 предотвращают [3, 4] перекос заготовки в начальной стадии прокатки. Деформирующими клиньями 5 формируют ступени диаметром 24 мм и 20 мм. Отрезными ножами 6 от заготовки отделяют концевые отходы. В заключительной стадии прокатки заготовку разделяют на две детали.

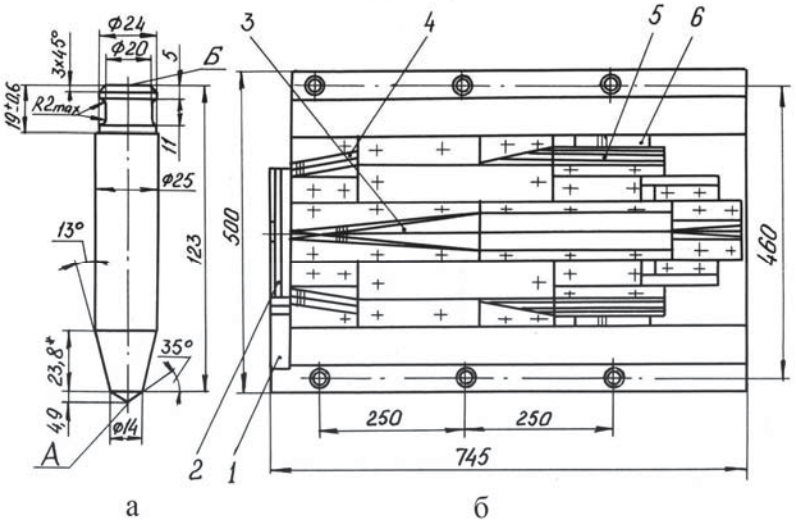



Рисунок 1 – Зубок РКС1.00.00.111 (а) горнопроходческого комбайна и клиновой инструмент (б) для ее изготовления

Геометрические параметры деформирующего клина 3: $\beta_1$=7°, $\alpha_1$=17° на длине 105 мм, $\alpha_2$=33° на длине 70 мм, $\alpha_3$=31° на длине 70 мм, $\alpha_4$=12° на оставшейся длине клина. Переменный угол наклона боковой грани клина способствует четкому оформлению конусной поверхности зубка. Максимальная степень обжатия δ=1,79. Геометрические параметры деформирующего клина 5: β=9°, α=25°, максимальная степень обжатия δ=1,25.

После ПКП в зубке сверлится отверстие по оси конусной части, куда впаивается твердосплавный резец. После термообработки деталь готова к употреблению.

Технология ПКП заменяет токарную обработку, коэффициент использования металла увеличивается с 0,85 до 0,95, производительность труда возрастет в 2,5 раза [5, 6].

Аналогичная технология для зубка Д6-22, применяемого в шахтах для добычи соли, разработана для ОАО «РМЗ» (г. Солигорск). В этом случае также заменяется процесс токарной обработки. Коэффициент использования металла увеличивался с 0,79 до 0,93, производительность труда возрастала в 8 раз.

Условия работы зубков горнодобывающих комбайнов связаны с комплексным силовым воздействием, включающим высокие статистические и динамические нагрузки, температуры в зоне контакта, присутствие абразива. Зубок изготовлен составным: корпус из стали 35ХГСА, наконечник из твердого сплава ВК6, который запаян в корпус [7, 8]. Узким местом данной детали является зона термического влияния, образованная в результате пайки высокотемпературным припоем твердого сплава в корпус. В результате 1-2 дневной работы разупрочненная область корпуса интенсивно изнашивается, что приводит к выпадению твердого сплава из корпуса. Если вырабатываемая соль и вмещающие породы отличаются повышенной абразивностью, высокой вязкостью и твердостью, то причиной выхода из строя инструмента является абразивный износ зубка (изготовленной из стали 35ХГСА), приводящий к выпадению твердосплавной режущей вставки.

**Лазерное упрочнение зубков**

Анализ условия работы зубка показывает необходимость интенсивного упрочнения, что достижимо при проведении процесса лазерного легирования. Метод лазерного легирования позволяет насыщать поверхностные слои металлов простыми и сложными материалами, формировать широкий спектр легированных поверхностных структур. Есть все основания считать, что данный метод позволяет значительно улучшить физико-механические свойства зубка и обеспечить высокие твердость и износостойкость поверхности.

Боридный слой, полученный на оптимальных режимах обработки, образованный из обмазки на основе карбида бора, состоит из округлых включений, располагающихся на поверхности слоя, и эвтектики. Округлые включения являются первичными кристаллами боридов с высокой твердостью. В свою очередь, округлая форма боридов определяет такую же форму кристаллов эвтектики. По сравнению с основным металлом слои имеют более низкую скорость травления, что свидетельствует об их высокой коррозионной стойкости.

При увеличении скорости перемещения лазерного луча свыше 200 мм/мин., либо при увеличении диаметра фокального пятна, структура легированного слоя при легировании обоими соединениями меняется. Бориды здесь имеют различную форму – ромбическую, призматическую или дендритную. На поверхности располагается сплошная светлая пленка с иглами, направленными вглубь образца, микротвердость которой составляет 12000-13000 Мпа. Внутри находятся включения овальной формы. Под пленкой располагаются бориды дендритного типа и эвтектика с микротвердостью 8000-9000Мпа. Несмотря на высокую твердость тонкой пленки, она иногда имеет неудовлетворительную адгезию с основой и может скалываться. Это в основном относится к составу $B_4C$. Использование борида вольфрама при увеличении скорости перемещения лазерного луча позволяет получить поверхностные слои этого борида. Слой может также содержать борид железа и вольфрама $W_2FeB_2$. Однако глубина легированного слоя снижается.

При легировании боридом вольфрама следует добиваться структур с максимально равномерным распределением легирующих компонентов. Уже двукратное перемещение лазерного луча или использование сканирующего луча дает очень равномерную структуру. Различаются несколько областей с разным размером зерна. Наименьшее наблюдается у самой поверхности, в зоне сплавления с основой видны дендритные образования.

В результате данной обработки, кроме твердости, коррозионной стойкости, значительно повышается и теплостойкость стали 35ХГСА. При температуре отпуска до 650°С не происходит значительного снижения микротвердости в зоне легирования, после 4-х часового отпуска при 750°С микротвердость падает до 7000Мпа. Исследования на теплостойкость показывают тот факт, что интегральная микротвердость упрочненного слоя сохраняется до 600-650°С, высокая микротвердость отдельных структурных составляющих сохраняется и до более высоких температур.

В результате проведенных работ были исследованы режимы ПКП и разработаны технологические схемы процессов ПКП [9, 10] изготовления зубков горнодобывающих комбайнов (рис. 2) и их лазерное легирование.

Изучение условий работы зубка позволило определить варианты лазерного легирования его конусной поверхности. Детальные изучения микроструктуры при лазерной обработке позволило выбрать основные легирующие компоненты, режимы обработки, состав защитной среды и параметры лазерного источника.

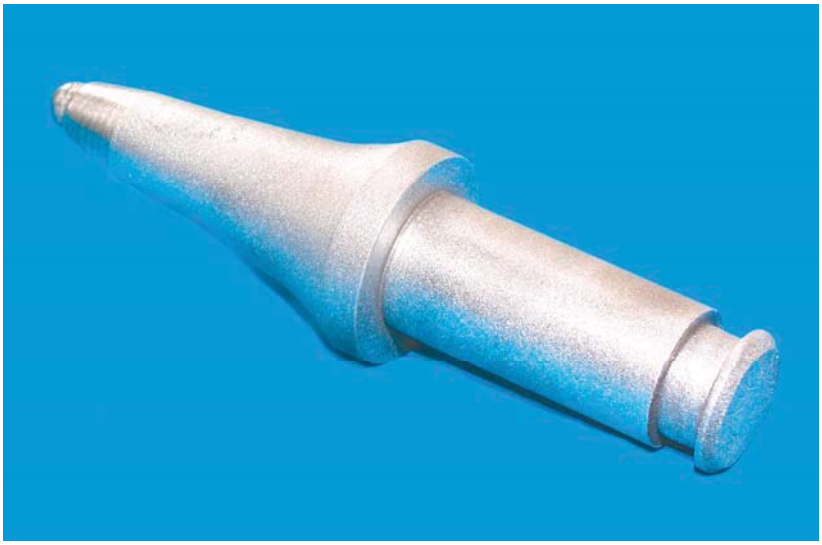


Рисунок 2 – Зубок горнодобывающего комбайна

**Выводы**

Разработана технология ПКП зубков горнодобывающих комбайнов с последующим лазерным легированием рабочей части [11] позволяет значительно улучшить физико-механические свойства зубка и обеспечить высокие твердость и износостойкость поверхности. Применение лазерного поверхностного легирования увеличивает ресурс работы режущего инструмента в 2-3 раза.

## Список литературы

1. *Щукин, В.Я.* Основы поперечно-клиновой прокатки / В.Я. Щукин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 223 с.

2. *Степаненко, А.В.* Предварительная вальцовка заготовок под штамповку балок передней оси автомобилей МАЗ / А.В. Степаненко, Л.А. Исаевич, В.А. Король, В.А. Томило // Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – № 9. – С. 11–13.

3. *Кожевникова, Г.В.* Построение эпюр контактных напряжений на границе инструмент–заготовка при поперечной прокатке / Г.В. Кожевникова // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 1. – С. 94–99.

4. *Kozhevnikova, G.* Cross-wedge rolling / G. Kozhevnikova. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2012. – 321 c.

5. *Щукин, В.Я.* Новое в поперечно-клиновой прокатке / В.Я. Щукин, Г.В. Кожевникова, А.О. Рудович // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 3. – С. 35–37.

6. *Степаненко, А.В.* Особенности прокатки периодических заготовок со значительными перепадами толщин / А.В. Степаненко, Л.А. Исаевич, В.А. Король, М.И. Сидоренко, В.А. Томило // Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – № 9. – С. 14–15.

7. Solid-state laser fusion of spherical titanium powders / K.E. Belyavin, D.V. Minko, O.O. Kuznechik et all / Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Springer New York. – 2008. – Vol. 47, No. 7-8. – pp. 500–505.

8. Evaluating the nature of the pressure distribution in a powder in electric-impulse sintering under conditions of uniaxial two-sided elastic prepressing / O.O. Kuznechik, D.V. Minko, K.E. Belyavin, E.G. Grigoryev / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – Vol. 86, Issue 5. – P. 1240–1250.

9. *Shchukin, V.Y.* Cross-wedge rolling at PTI NAS Belarus / V.Y. Shchukin, G.V. Kozhevnikova, V.V. Petrenko // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 201–202. – P. 1198–1202.

10. *Çakırcalı, M.* Cross wedge rolling of a Ti6Al4V (ELI) alloy: the experimental studies and the finite element simulation of the deformation and failure / M. Çakırcalı, C. Kılıçaslan, M. Güden, E. Kıranlı, V.Y. Shchukin, V.V. Petronko // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 65, Issue 9-12. – pp 1273–1287.

11. *Кожевникова, Г.В.* Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 291 с.

## CROSS-WEDGE ROLLING OF CUTTERS FOR MINING COMBINES

**Shchukin V. Ya.**, C.Sc. (Engineering), Chief Researcher, e-mail: fti@tut.by

«Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus»
State Scientific Institution , vul. Akademika Kupreviča, 10, Minsk BY- 220141, Belarus

**Abstract:** The technology of cross-wedge rolling of cutters for mining combines was elaborated for mining machines manufacturing enterprises. The cutter working part is subject to laser doping over the rolled surface directly.

**Keywords:** cross-wedge rolling, cutters for mining combines, laser hardening.

**УДК 621.77**

# СВАРКА В ПРОЦЕССЕ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ

*В. Я. ЩУКИН*, *кандидат техн. наук*
(*ФТИ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь*)

220141, г. Минск, ул. Купревича, 10,
Государственное научное учреждение "Физико-технический институт НАН Беларуси",
e-mail: fti@tut.by

**Аннотация:** Нами разработан способ получения осесимметричных деталей с поверхностными и внутренними слоями из различных сплавов, а также получение герметичных полых валов деформационной сваркой при поперечно-клиновой прокатке. Сварка происходит в едином технологическом цикле с формообразованием поковки. Получение качественного неразъемного соединения осуществляется за счет пластической деформации свариваемых частей при температуре горячей обработки давлением. Данная разработка позволяет получать детали с требуемыми свойствами внутреннего либо внешнего слоя.

**Ключевые слова:** поперечно-клиновая прокатка, деформационная сварка, слоистые валы.

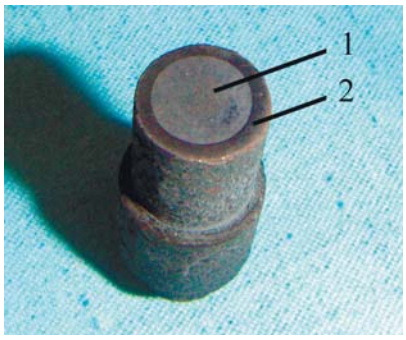
**Введение**

Нами впервые открыт эффект деформационной сварки металлов при поперечно-клиновой прокатке (ПКП) [1], который позволяет получать многослойные ступенчатые валы из различных материалов. Сварка происходит в едином технологическом цикле с формообразованием поковки. Получение качественного неразъемного соединения осуществляется за счет пластической деформации свариваемых частей при температуре горячей обработки давлением.

**Свойства сварного шва**

На рис. 1,а показана в разрезе деталь палец синхронизатора трактора МТЗ, наружный слой которой выполнен из стали 12ХН3А, внутренняя часть детали (основа) выполнена из стали 45. Микроструктура области полученного соединения показана на рис. 2,а. Особенностью сварки при ПКП является незначительная толщина сварного шва: не более 2 мкм. На рис. 1,в показан полый герметичный вал из стали 45, в который методом ПКП вварены с двух сторон заглушки, также из стали 45. На рис. 2,б показана микроструктура этого соединения из однородного металла, на котором вообще не различим сварной шов, т.к. материал не имеет переходной зоны и представляет собой сплошной металл (сталь 45).

Прочность сварного шва настолько высока, что позволяет прокатанную слоистую заготовку в дальнейшем штамповать или прокатывать методом продольной прокатки [2–4] без нарушения сплошности сварного соединения (рис. 1,б). Таким образом, могут быть получены слоистые поковки или слоистые листы.




а

б

в

Рисунок 1 – Деталь палец синхронизатора трактора МТЗ после прокатки (а) (1 – центральный стержень из материала-основы стали 45; 2 – тонкостенная втулка из стали 12ХН3А), слоистая поковка (б) и герметичный вал из стали 45 (в)

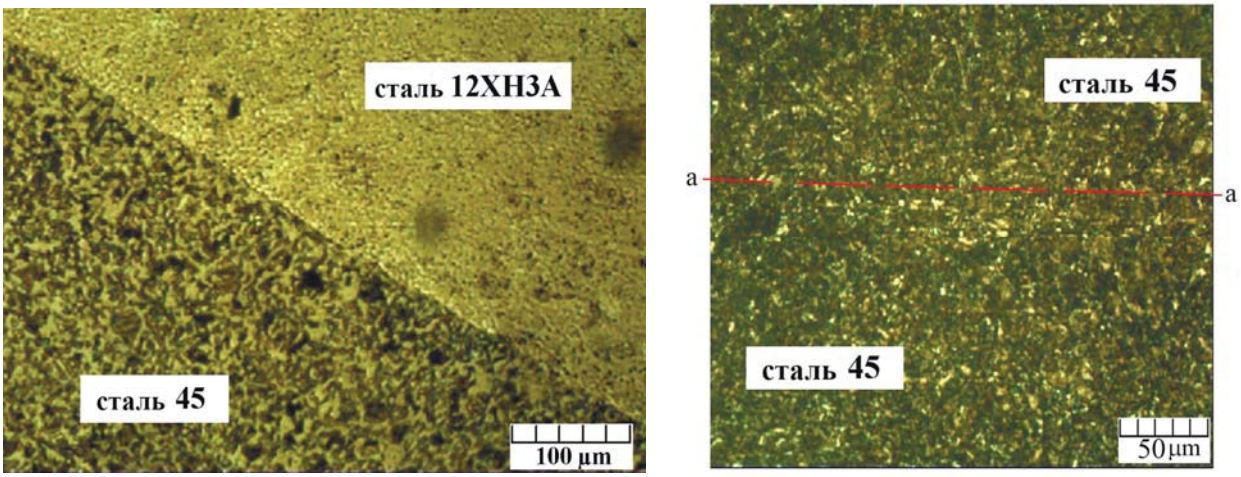



Рисунок 2 – Микроструктура сварного шва: сталь 45–сталь 12ХН3А (а) и сталь 45–сталь 45 (б)

**Технология сварки**

Технология сварки при ПКП включает следующие операции:

— на цилиндрическую заготовку из материала основы надевают снаружи втулку из другого материала;

— собранную таким образом заготовку нагревают токами высокой частоты;

— затем заготовку деформируют методом ПКП, получая ступенчатый вал, или цилиндрическую заготовку с меньшим наружным диаметром.

Процесс ПКП в этом случае выполняет одновременно два действия: придание необходимой формы валу и сварку его слоев – двух, трех и более.

Прочность сварного шва нами определялась испытанием на отрыв поперек его слоя и на сдвиг вдоль него. Проводились сравнительные испытания сварного шва, полученного методом ПКП, и сварного шва, полученного традиционным методом – электродуговой сваркой. В результате установлено, что прочность шва при ПКП превышает прочность традиционной сварки в 1,2 раза. Прочность шва пары сталь 45–сталь 12ХН3А составила 79% прочности стали 45.

Освоены технологии сварки в сочетании материалов: сталь 45–сталь 45; сталь 45–сталь 12ХН3А; сталь 45–сталь 20Х13; титан для медицины – титан технический.

**Преимущества новой технологии**

Преимущества новой технологии заключаются в удешевлении продукции за счет того, что дорогостоящий металл, например нержавеющая сталь, используется в ограниченном количестве только на поверхности изделия, а основная масса заготовки – это дешевая обыкновенная сталь. Второе преимущество – это расширение области применения ПКП. Высоколегированные стали из-за ограниченной пластичности подвержены вскрытию осевой полости при ПКП, и по этой причине их не используют для этого процесса [5, 6]. Слоистый вал с материалом основой из пластичной стали этому дефекту не подвержен, в то же время его высокие эксплуатационные свойства будут определяться высоким качеством поверхностного слоя, где при прокатке действуют сжимающие напряжения, препятствующие разрушению малопластичных металлов. В итоге производство слоистых валов с малопластичными поверхностными слоями – это новая ниша, ранее не применявшаяся в ПКП [2, 5].

**Теоретические основы технологии**

Согласно современным представлениям теории пластического течения деформация металла сопровождается двумя одновременно протекающими процессами: первое — зарождением дефектов в металле в виде микропор и вторым процессом — завариванием этих микропор [7, 8]. Скорости этих двух процессов определяют напряжения в очаге деформации. При растягивающих преобладает процесс зарождения микропор, при сжимающих напряжениях — процесс их заваривания [9, 10]. Отсюда вытекает вполне логичное предположение, что на деформационное разрушение и на деформационную сварку влияют одни и те же параметры деформации: температура, напряженное состояние, немонотонность процесса и величина накопленных деформаций.

Предложенный нами критерий деформационной сварки [11] предполагает, что сварка наступает тогда, когда накопленные деформации превосходят определенный порог

$\Lambda_{св}$, который, как и разрушение, зависит от ряда параметров.

Эксперименты по сварке осуществляли по технологии ФТИ НАН Беларуси [10] на плоскоклиновом стане. В качестве образца были выбраны материал-основа сталь 45, материал втулки сталь 12ХН3А. Прокатка осуществлялась на стационарной стадии со скоростью 0,3 м/с при температуре 1420 К с обжатием 1,71 на клиновом инструменте с геометрическими параметрами: угол заострения β=9°, угол наклона боковой грани α=30° [12].

В псевдожесткой области (вне зоны контакта и вблизи наружной поверхности образца) действуют растягивающие средние напряжения, которые, несомненно, не способствуют сварке металла, а наоборот могут привести к разрушению сварного шва, сформированного в зоне основного очага деформации. Установление факта такого распределения напряжений позволило уточнить критерий сварки вторым условием: возможности разрушения сварного шва при прохождении им псевдожесткой зоны [12].

Параметр третьего инварианта девиатора напряжений – сжимающий в основной области очага деформации и растягивающий в псевдожесткой области.

В итоге нами установлено, что для сварки стали 45 и стали 12ХН3А при температуре 1420 К необходимо накопить деформацию не менее 4,6, создать в основной области очага деформации среднее нормальное напряжение – $0{,}15\cdot10^9$ Па и показатель третьего инварианта девиатора напряжений от –0,7 до –0,6.

Критерий сварки может быть записан в виде двух условий:

1) Условие сварки:

$$\Lambda \geq \Lambda_{св} = f\left(\frac{\sigma}{K};\frac{\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}}{K};T;\Omega\right), \qquad (1)$$

где $\Lambda_{св}$ – порог степени деформации сдвига по сварке; σ – среднее нормальное напряжение; К – пластическая постоянная материала; $J_3(D_\sigma)$ – третий инвариант девиатора напряжений; Т – температура металла; Ω – показатель увеличения пластичности при немонотонном деформировании.

2) Сформированный слой не должен разрушаться в псевдожесткой области (по деформационному критерию разрушения):

$$\Lambda \geq \Lambda_{пр} = f\left(\frac{\sigma}{K};\frac{\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}}{K};T;\Omega\right), \qquad (2)$$

где $\Lambda_{пр}$ – предельная степень деформации сдвига.

**Заключение**

Впервые в мире установлен эффект сварки в том числе разнородных металлов и сплавов при поперечно-клиновой прокатке заготовки со втулкой предварительно размещенной на ее наружной поверхности. Установлено, что прочность сварного шва на отрыв и сдвиг соизмеримы с прочностью исходного металла, а толщина шва не превышает 2 мкм. Показано, что критерием сварки является достижение для каждого сочетания пар материалов определенных величин сжимающих средних нормальных напряжений, степени деформации сдвига и температуры деформации: для сварки стали 45 и стали 12ХН3А при температуре деформации 1420 К среднее нормальное напряжение должно превышать или быть равно $-0{,}15\cdot10^9$ Па, а степень деформации сдвига быть более 4,6.

Открытый эффект позволяет существенно улучшить эксплуатационные и экономические характеристики машиностроительных деталей.

Перспективы и области применения новой технологии: пищевая и химическая промышленность – замена валов из дорогостоящей нержавеющей стали на дешевые слоистые валы с наружным слоем из нержавеющей стали; бытовая и коммунальная техника – замена латунных водопроводных кранов на слоистые валы с латунным наружным слоем; автомобильная промышленность – снижение веса валов за счет уменьшения диаметра более прочных слоистых валов; моторостроение – получение поковок коленвалов и шатунов из более прочных слоистых заготовок; машиностроение – повышение износостойкости пар трения (например, шаровых пальцев, кулачков) за счет применения слоистых валов с наружным слоем из деформированных чугунов; медицинская техника – снижение стоимости эндопротезов за счет штамповки слоистых валов с наружным слоем из титана и материалом–основой из стали.

## Список литературы

1. Способ изготовления осесимметричной слоистой ступенчатой детали: пат. 13417 Респ. Беларусь, МПК B21 H 1/00. / В.Я. Щукин, Г.В. Кожевникова; заявитель ФТИ НАН Беларуси. – № a20081431; заявл. 13.11.2008; опубл. 30.08.2010 // Афіцыйны бюлетэнь / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 4. – С. 74, 75.

2. *Щукин, В.Я.* Основы поперечно-клиновой прокатки / В.Я. Щукин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 223 с.

3. *Степаненко, А.В.* Предварительная вальцовка заготовок под штамповку балок передней оси автомобилей МАЗ / А.В. Степаненко, Л.А. Исаевич, В.А. Король, В.А. Томило // Кузнечно-

штамповочное производство. – 2001. – № 9. – С. 11–13.

4. *Степаненко, А.В.* Особенности прокатки периодических заготовок со значительными перепадами толщин / А.В. Степаненко, Л.А. Исаевич, В.А. Король, М.И. Сидоренко, В.А. Томило // Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – № 9. – С. 14–15.

5. *Щукин, В.Я.* Новое в поперечно-клиновой прокатке / В.Я. Щукин, Г.В. Кожевникова, А.О. Рудович // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 3. – С. 35–37.

6. *Кожевникова, Г.В.* Построение эпюр контактных напряжений на границе инструмент–заготовка при поперечной прокатке / Г.В. Кожевникова // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 1. – С. 94–99.

7. *Shchukin, V.Y.* Cross-wedge rolling at PTI NAS Belarus / V.Y. Shchukin, G.V. Kozhevnikova, V.V. Petrenko // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 201–202. – P. 1198–1202.

8. *Çakırcalı, M.* Cross wedge rolling of a Ti6Al4V (ELI) alloy: the experimental studies and the finite element simulation of the deformation and failure / M. Çakırcalı, C. Kılıçaslan, M. Güden, E. Kıranlı, V.Y. Shchukin, V.V. Petronko // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 65, Issue 9-12. – pp 1273–1287.

9. Solid-state laser fusion of spherical titanium powders / K.E. Belyavin, D.V. Minko, O.O. Kuznechik et all / Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Springer New York. – 2008. – Vol. 47, No. 7-8. – pp. 500–505.

10. Evaluating the nature of the pressure distribution in a powder in electric-impulse sintering under conditions of uniaxial two-sided elastic prepressing / O.O. Kuznechik, D.V. Minko, K.E. Belyavin, E.G. Grigoryev / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – Vol. 86, Issue 5. – P. 1240–1250.

11. *Kozhevnikova, G.* Cross-wedge rolling / G. Kozhevnikova. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2012. – 321 c.

12. *Кожевникова, Г.В.* Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 291 с.

## WELDING DURING CROSS-WEDGE ROLLING

**Shchukin V. Ya.**, C.Sc. (Engineering), Chief Researcher, e-mail: fti@tut.by

«Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus»
State Scientific Institution , vul. Akademika Kupreviča, 10, Minsk BY- 220141, Belarus

**Abstract:** We elaborated a method of manufacturing axisymmetric parts with superficial and inner layers of various alloys, as well as manufacturing hermetically sealed hollow shafts by deformation welding during cross-wedge rolling. Welding occurs in the united technological cycle with forming a forging. A qualitative non-detachable joint is made by plastic deformation of welded parts at hot plastic working temperature. This process makes it possible to produce a part having the required superficial and inner layer properties.

**Keywords:** cross-wedge rolling, welding deformation, layered shafts.

**УДК 378.147:004.032.6]:514.18**

# SYMBIOTIC COOPERATION OF INNOVATION AND DEVELOPMENT BETWEEN CHINA AND RUSSIA

*Changxiong Sun, Director of the Institute of Economic and Technical Cooperation between China and Russia Harbin Institute of Technology, Doctor, Professor,*

E-mail: sunchangxiong2013@126.com
Wanrui Sun, Harbin Institute of Technology doctoral student; Senior Economist
E-mail:swr1926@126.com

**Abstract:** This paper introduces the biology theory of symbiotic system and dynamics theory to guide the development of Sino-Russian cooperation in innovation practice. China-Russia strategic cooperation partnership will continue to work closely to the depth; especially innovation and development of mutual cooperation and symbiotic interdependence become closer. Innovation-driven development of China and Russia needs to have enough "incremental innovation" support. In order to accelerate these two countries 'incremental innovation' development, complementary to the traditional theory cooperative symbiosis theory must be enhanced to guide the innovation and development of Sino-Russian cooperation in practice. To achieve better innovation and development of Sino-Russian strategic objectives, symbiotic innovation for development cooperation can gather innovative elements to realize overall optimization of innovation system functions and effectively enhance "incremental innovation".

**Keywords:** symbiotic theory; system dynamics theory; symbiotic system optimization; integration advantages; incremental innovation; innovation and development of symbiotic cooperation.

1. Symbiosis theory and dynamical systems theory guide the innovative development of Sino-Russian

As a concept of ecology, symbiosis was first presented by German mycologist Anton de Bary in 1879, and he defined symbiosis as organisms of different species living together in accordance with the substance of a linked state. In general sense, symbiosis is a relationship where symbiotic unit lives under certain shared environment. Symbiosis is not only a biological phenomenon, natural state and biometric mechanism, but also a social phenomenon, resilience state and a social scientific method. Research on symbiosis has been widely extended to the ecological, social, and economic field, where survival and development of each individual are interrelated and benefit from each other, and this would finally form an interdependent, co-existence and collaborative system. China-Russia strategic cooperative partnership have nature of symbiosis, especially these two countries' innovative development strategy are highly interdepended and symbiotic. In the near future, these both countries' innovation-driven development need more close cooperation and "incremental innovation" support. In order to accelerate two countries' "incremental innovation" support, cooperative symbiosis theory must be enhanced to guide the innovation and development of Sino-Russian cooperation in practice complementary to the traditional theory. To achieve better innovation and development of Sino-Russian strategic objectives, symbiotic innovation for development cooperation can gather innovative elements to realize overall optimization of innovation system functions and effectively enhance "incremental innovation".

System refers to putting the scattered things sort in order and finally forms a holistic state. System dynamics theory means that every system must have structure, where structure refers to the network of a

group action or decision rules composed of interlocking and determines the function of system. According to the feedback features from internal elements' interrelated behaviors in the system, it's would be possible to find the mutual innovation cooperation point from the inner symbiotic structure relationship. With China and Russia's strategic cooperative partnership, two countries' innovation-driven developments are systematic integral, so these two countries development should be taken as whole system integrity, namely put two countries' innovation driven elements as an interrelated system. Based on the independent relationship between systematic behavior and inner mechanism to study two countries' creative elements interrelated relationship, explore the reason to produce new innovative form and find the cooperation point, it's helpful to realize the full system's optimization. Factors taken to a meeting point, cluster-optimized combination of innovative elements to achieve a harmonious interaction between the two countries, and the overall effect to maximize innovation, promote maximization "incremental innovation" values, promoting the meeting point of the "incremental innovation" enhanced by Great, Russia and China finally reached the symbiosis of innovation and development goals.

2. Deepen mutual trust and form a symbiotic value of cooperation so that the continuity of symmetry toward innovative collaboration symbiotic mutualism stages of development

At present, Sino-Russian cooperation are at the stage of continuity asymmetric mutualism symbiosis. With the Sino-Russian strategic partnership of cooperation moving towards the deeper and closer cooperation and development, it is necessary to promote the two countries' mutual cooperation to move towards continuous symmetry symbiotic phase transformation. Only if the development stage arrives at the continuity of symmetry mutualism can enhance the strong increase in both "incremental innovation." The conversion from continuous asymmetric phase to the continuous symmetry mutualism needs China and Russia to cooperate in a symbiosis innovative way and form a shared symbiotic value. Symbiosis value needs each individual's mutual respect, equal treatment, mutual independence, mutual penetration, harmonized symbiosis and value of mutual evolution, and the same time it also allows differences of each individual's mutual tacit understanding, interaction, behavior, penetration, transformation, competition, synergy and innovation. As a new form of cooperation, the most prominent feature of symbiosis is breaking the traditional cooperation boundaries and through the effective integration of innovation resources achieving strategic objectives of coexistence, namely symmetrical mutualism evolution.

In the process of seeking for symbiotic values, cooperation of innovation and development between China and Russia should insist on mutual trust and tolerance, assume shared responsibility, form symbiotic cooperation value, make symbiosis environment, explore the symbiosis mode, and produce symbiotic effect. Cooperation and mutual trust is the best resource for cooperation, and also the basis for symbiosis. Both countries can not live up to trust each other. From beginning to end, building innovation symbiotic partnership should always enhance mutual trust and cooperation through symbiosis, deepen each other's communication and understanding, and enhance mutual respect. With this good foundation of mutual trust, cooperation will guide the way to symbiotic innovation.

3. Key tasks for China and Russia to develop symbiosis innovation cooperation

Innovation and development of cooperation between China and Russia to engage in symbiotic important aspect of innovation-driven development of close bilateral co innovation make development cooperation work.

3.1 From the innovation-driven level of Sino-Russian development strategy to build symbiosis innovative cooperation

From innovation-driven level of the bilateral development strategy, Chinese and Russian governments should organize forces, make deep research on connectivity, interdependence and topology and propose effective symbiosis docking adapter innovative cooperation projects and

promoting substance.

3.2 From China-Russia industrial level to implement advantage element collaborative innovation and form “China-Russia symbiosis innovation cooperation industry” new economy plate

Symbiotic innovation development cooperation should be based on bilateral industrial technological innovation. It is required to improve two countries’ key industrial technological innovative capacity and industry structure update as a focus and mission. According to system integrity and optimization of the structure, restructuring advantageous elements, including elements of capital, technology, resources, personnel and marketing system, and optimization and reorganization, collaborative innovation, industrial innovation elements can activate and enhance the ability of innovation and development, and cooperation to create a new industrial economy. In the long run, we can develop a unique economic sector in two countries along the "Sino-Russian cooperation in industrial symbiosis innovation" New Economy Forum by the two sides of industry innovation lasting in-depth cooperation. This will become the future economic development of the two new highlights.

Firstly start from China-Russia energy symbiosis cooperation to accumulate effective and useful China-Russia industry symbiosis cooperation mode. On energy cooperation, China and Russia has taken vertically integrated symbiotic cooperation. The principle of "risk-sharing, benefit-sharing" innovative model of cooperation is not a simple style in which I sell and you buy, but the tightness cooperation, namely China participating in the Russian upstream projects while Russia participating in China downstream refineries program to realize complementary advantages. This is a real win-win situation, where the future of China-Russia reflects a new idea of cooperation in the energy field symbiosis, and this "vertically integrated" symbiotic model cooperation will be more widely used in more industrial cooperation in the future. With the Sino-Russian energy cooperation continuing to deepen, this will lead a series of industrial cooperation between China and Russia.

3.3 From China and Russia to carry out the enterprise level innovation and development go hand in hand cooperation, enhance the core competitiveness of innovative enterprises together

Enterprises are the main force for symbiosis innovation and development cooperation, Chinese and Russian enterprises together innovative symbiosis will promote innovation and development cooperation. In order to better play the advantages of innovation and development of enterprises of both sides, China and Russia can choose 100 important industrial enterprises to develop innovation and cooperation hand in hand. They can work together to build the worldwide influential competitive cooperation on large projects to improve both industry's competitiveness in the international arena. The formation of a joint large enterprise groups can allocate optimal resources and take complementary advantages, while economies of scale could enhance the strength and competitiveness of multinational operations.

3.4 From the level of China-Russia science and technology incubator symbiosis of innovation and development cooperation, gathering resources for innovation, incubator "incremental innovation" boost bilateral economic co innovative development

China and Russia have built a large number of technology incubators, and theses incubator projects and human resources cooperation is helpful for innovation and economic development between the two countries. China and Russia are both rich in resources, these two countries building science and technology incubator together can shorten the research and development cycle, accelerate technological innovation projects achievements, hatching out better and more "incremental innovation", and boost innovative economic symbiosis between the two countries. Now China-Russia science and technology incubator of innovative projects include new energy (super capacitors, heat pumps, biomass energy), new materials (titanium and titanium alloys, silicon oxide, nanometer, composite rare earth permanent magnet materials, graphite, Carbon, high-performance fiber

super hard materials, powder metallurgy, refractory metals, wear-resistant alloys, etc.), high-end equipment manufacturing (robots, robot reducer, precision machinery, turbochargers, gas turbine, welding equipment, hydraulic machinery, pumps, valves, solenoid valve, precision bearings), electronic information, sensors, photoelectric technology, instrumentation, electrical, electrical, motors, transformers, rectifiers, bio-medicine, biological products, vaccines, petrochemicals, coal chemicals, synthetic rubber, chemicals, forestry chemical, hydrolysis technology, green (low dairy products, additives, feed, yeast), environment (water purification, purification, waste water treatment, atmospheric environment, solid dust control, clean production and clean technology), mining (mining, mineral processing , mining machinery), etc.

3.5 From the innovation and development of China-Russia financial aspects of symbiotic cooperation to set up financing platform for innovative companies

China and Russia innovative enterprises are both experiencing difficulties in financing. In order to accelerate the development of innovative enterprises in these two countries, cooperation should be expanded to strengthen the Sino-Russian financial aspects of symbiosis and explore various forms of financing cooperation mode for innovative enterprises. China and Russia should jointly build financial cooperation center for innovative enterprises, establish Sino-Russian business cooperation innovative commercial banks. The problem of financing could be settled through financial cooperation and cooperation between banks and enterprises. Two governments should expand innovation fund by establishing venture capital fund size. Both countries could start to relax for innovative companies to provide financing of market access conditions, implement different tax policies, regulatory policies and make law and regulations which is helpful for every kind of knowledgeable capitalized innovative companies.

4. China and Russia symbiotic safeguard mechanism innovation for development cooperation

4.1 Symbiosis of innovation and development of Sino-Russian cooperation could be carefully prepared at the top-level design planning at the national level, and government organization and leadership development cooperation should also be strengthened. Policy of innovation and development introduced by China and Russia must take into account the symbiotic cooperation of the overall interests of the effect.

4.2 All levels governments from China and Russia should make innovation and development cooperation symbiotic coordination leading role, to create a favorable symbiosis innovation cooperation policy and legal environment. Long-term and effective cooperation institutional coordination mechanism should be established to interact with symbiotic innovation and development.

4.3 Establishing Sino-Russian symbiotic interface (include information, material and energy conducting media, channels and transporters) smooth passage

Symbiotic theory assumes that smooth symbiotic interface material, energy and information flow and exchange of symbiosis between the units to provide smooth passage, so that symbiotic process continuously produced new energy. Smooth symbiotic interface can promote the development of symbiotic systems. Conversely, if the symbiotic interface sluggish, the "third" (material flow, energy flow and information flow) poor will lead to less symbiotic creative energy, and lack of creative energy will weaken incentives symbiotic symbiosis between the cells, resulting in poor circulation, eventually leading to stagnation symbiotic innovation cooperation.

4.4 China-Russia symbiosis innovation development cooperation needs government, market and enterprises work together. Institutional innovation should be paid more attention, and China and Russia should strengthen the main role of the market, improve cooperation enterprise innovation and development capabilities. Power improvement of enterprises from two countries could finally continuously provide incentive for symbiotic innovative development.

**УДК 378.147:004.032.6]:514.18**

# РЕАЛИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ГРАФИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Н. Н. КУЗНЕЦОВА,*
*А. Ю. МАРЧЕНКО, канд. техн. наук,*
*Г. В. СЕРГА, доктор техн. наук, профессор*

Серга Г. В. -350044, г. Краснодар, ул. Калинина 13,
Кубанский государственный аграрный университет
e-mail: serga-georgv@mail.ru

**Аннотация:** В статье рассматриваются вопросы преподавания начертательной геометрии и инженерной графики в Кубанском государственном аграрном университете, повышение мотивации студентов к получению необходимых компетенций, позволяющих грамотно выполнять чертежи. Для проведения лекционных и лабораторных занятий на кафедре начертательной геометрии и графики разработаны мультимедийные курсы с элементами анимации по всем изучаемым темам, обучающие презентации, раскрывающие специфику дисциплины, учтены особенности учебного процесса обучения в Кубанском государственном аграрном вузе. Применение мультимедийных разработок на кафедре начертательной геометрии и графики показал повышение результата успеваемости по сравнению с предыдущими годами проведения занятий без презентаций. Это свидетельствует о том, что использование мультимедийных лекций и лабораторных занятий позволяет повысить эффективность и качество обучения, а так же предоставляет возможность в большем объеме дать объяснение учебного материала для студентов.

**Ключевые слова:** мотивация к обучению, интенсификация обучения, адаптация первокурсников.

**Введение**

В настоящее время выдвигаются высокие требования к уровню профессиональной подготовки специалистов в области машиностроения. Одной из базовых составляющих подготовки будущих инженеров является графическая грамотность. Возникает необходимость совершенствования методов обучения для подготовки компетентных инженеров-машиностроителей. Первым этапом в формировании графической компетентности студентов является изучение на первом курсе дисциплины «Начертательная геометрия и инженерная графика», которая является основой в графической подготовке студентов. Навыки и знания, приобретенные в процессе изучения дисциплины необходимы для успешного изучения специальных дисциплин на старших курсах [1].

Резкое сокращение часов на изучение графических дисциплин по новым программам требует интенсификации работы преподавателя и студента, коренного пересмотра методики преподавания, улучшение материально-технического обеспечения курса. При этом, тенденция сокращения учебных часов, выделяемых учебными планами, к сожалению, не сопровождается сокращением объема материала, который следует прочитать на лекциях и закрепить на лабораторно-практических занятиях. Поэтому совершенствование образования путем реализации современных образовательных технологий в учебном процессе графической подготовки специалистов в области машиностроения является важной и актуальной.

До недавнего времени при объяснении учебного материала использовались только традиционные методы проведения занятий: вычерчивание вручную объяснений на доске, плакаты. Такой подход не позволял в достаточном объеме изложить изучаемую тему в связи с ограничением по времени. Некоторые вопросы отводились на самостоятельное изучение. Соответственно, снижалась эффективность обучения, необходим был новый качественный скачок в методиках преподавания. Это предопределило переход от традиционных методов обучения к активному использованию в процессе преподавания интерактивных технологий, соответствующих новейшим комплексным целям и задачам, предъявляемым к графическим дисциплинам [2].

Начертательная геометрия и инженерная графика - первая важнейшая дисциплина в формировании навыков графической инженерной деятельности будущих инженеров-

машиностроителей. В результате изучения дисциплины «Начертательная геометрия и инженерная графика» студент должен получить исчерпывающие знания об основных законах геометрического формирования, построения и взаимного пересечения моделей плоскости и пространства, которые необходимы для выполнения и чтения чертежей деталей, сборочных чертежей конструкций и составления конструкторской документации. Умение решать метрические задачи, выполнять построения, воспринимать оптимальное соотношение частей и целого на основе графических моделей, реализовывать свои знания и умения в виде чертежей конкретных пространственных объектов – это важнейшие направления, которые должен освоить студент, чтобы потом применить их при подготовке проектной документации станков, машин и при организации машиностроительного производства.

Успешное освоение начертательной геометрии и инженерной графики на первом курсе вуза способствует более легкому изучению других дисциплин графического цикла. Перед студентом-первокурсником ставятся сложные задачи освоения навыков, которые необходимы для выполнения и чтения чертежей деталей, составления конструкторской документации.

**Методика исследования**

На кафедре начертательной геометрии и графики Кубанского государственного аграрного университета внедрена адаптивная система подачи знаний. Отсутствие у первокурсников навыков и умений выполнения графических работ способно преодолеваться за короткое время, что дает большее время на выполнение основной задачи, стоящей перед преподавателями кафедры - основательная теоретическая подготовка по графическим дисциплинам. Первые занятия направлены на овладение приемами черчения и изучение требований, предъявляемые стандартами ЕСКД к выполнению чертежей. Чтение лекций и решение задач на лабораторных занятиях проводятся с использованием мультимедийных презентаций с сопровождением устного пояснения, а при необходимости и с демонстрацией приемов построения вручную (как правило, трудности построения изображений с помощью циркуля). Последовательность тем, предлагаемых к изучению, разбор конкретных заданий направлено на качественное усвоение учебного материала [1].

Основы графической грамотности, заложенные преподавателем начертательной геометрии крайне важны для развития специалистов данного направления: студент-первокурсник должен научиться решать задачи, выполнять построения. Полученные знания и умения должны реализовываться в виде чертежей конкретных объектов, чтобы потом применить их в дальнейшей учебной и производственной деятельности.

Использование мультимедийных технологий в виде обучающих курсов и презентаций, проецируемых на экраны, установленные в аудиториях кафедры начертательной геометрии и графики, с первых занятий помогает студентам в короткие сроки овладеть необходимыми компетенциями, позволяющими грамотно выполнять чертежи [1].

Для проведения лекционных и лабораторных занятий для студентов разработаны мультимедийные курсы с элементами анимации по всем изучаемым темам, обучающие презентации, раскрывающие специфику дисциплины «Начертательная геометрия и инженерная графика».

Наглядное объяснение материала курса начертательной геометрии в ясной структурированной форме позволяет студентам успешно воспринимать информацию преподавателя. Впоследствии любую полученную таким образом информацию студент сможет разделять на отдельные группы знаний, которые будут образовывать у студентов-первокурсников новую ступень мышления - визуально-логическую. Активное восприятие такой учебной информации требует специальной организации, продуманных способов подачи учебного материала [3]. Наиболее простой и логичной формой для осуществления вышесказанного является визуализация учебного материал при помощи мультимедийных обучающих курсов.

Поэтому подача теоретического материала осуществляется в виде развернутого комментария преподавателя к сопровождающим анимационным слайд-фильмам. Все слайд-фильмы дают исчерпывающую наглядную информацию о предмете тематической дискуссии, раскрывая основные сложившиеся подходы к его проблематике.

Визуальное (зрительное) восприятие на данном этапе является ключевым элементом погружения студентов в дисциплину, что связано с механизмом, действия данного процесса: зрительное восприятие - процесс, который объединяет в себе одновременно две важнейших составляющих процесса запоминания. При зрительном восприятии, с одной стороны, детали увиденного интерпретируются по схожим признакам в единый целостный массив, с другой – для интерпретации увиденных данных, мозг, исходя

из накопленных знаний о принципах классификации предметов, старается разбить данные предметы на определенные общности, удобные для классификации и запоминания. Данные особенности мозга, а также то, что разнообразие способов интерпретации учебного материала (наглядная визуализация, в сочетании с теорией и устным изложением) позволяет снизить интеллектуальную нагрузку на учащихся, обуславливают крайнюю степень важности развития мультимедийных обучающих курсов по дисциплине «Начертательная геометрия и инженерная графика».

На кафедре начертательной геометрии и графики разработаны рабочие тетради для выполнения графических заданий в аудитории под руководством преподавателя с использованием мультимедийного оборудования и самостоятельной работе студентов. Решения выполняются непосредственно в рабочей тетради. Тематика и количество задач соответствует программе дисциплины.

Формирование графической грамотности студентов связано с расширением их самостоятельности (способность к самообразованию, саморазвитию и самостоятельному освоению графических знаний и умений). Самостоятельная работа студентов является основой для дальнейшей творческой деятельности. С этой целью на кафедре начертательной геометрии и графики преподавателями разработаны мультимедийные учебные пособия, размещенные на образовательном портале университета, для дополнительного самостоятельного изучения дисциплины студентами.

**Результаты и обсуждения**

Сравнение результатов изучения дисциплины «Начертательная геометрия и инженерная графика» показывает, что студенты, в обучении которых присутствовал элемент мультимедийных курсов, до 1,5 (полутора) раз более эффективно справляются с расчетно-графическими заданиями. 89% студентов-первокурсников без затруднений умеют анализировать геометрическую форму детали, 69% - умеют четко характеризовать особенности геометрической формы детали, 64% - легко решают метрические и позиционные задачи. Использование мультимедийных разработок заставляют студентов анализировать, сравнивать решения поставленных задач.

Исследования применения мультимедийных разработок на кафедре начертательной геометрии и графики показали повышение результата успеваемости на 15% по сравнению с предыдущими годами проведения занятий без презентаций.

Почти 90% студентов считают, что материал излагается преподавателем понятно и достаточно высоко, благодаря использованию мультимедийных технологий. Качество содержания анимационных слайдов (чередование текста и выполнение построений) устраивает 96% студентов.

Использование мультимедийных технологий – это создание базы данных для проведения лекций и лабораторных занятий, которые способствуют повышению эффективности и наглядности учебного процесса на кафедре начертательной геометрии и графики Кубанского государственного аграрного университета.

**Выводы**

1. Использование мультимедийных лекций и лабораторных занятий позволяет повысить интерес к изучаемой дисциплине, предоставляет возможность глубокого проникновения в сущность изучаемых явлений и процессов для студентов.

Использование мультимедийных технологий направлено на максимально полное и активное использование природных возможностей студентов за счет интеллектуальной доступности подачи учебного материала. Сочетание визуальной, текстовой и устной информации подводит студента к созданию целостного образа предмета на основании сочетания разных типов восприятия, подкрепленного легкостью получения информации при использовании возможностей компьютера.

2. Применение мультимедийных разработок на кафедре начертательной геометрии и графики показал повышение результата успеваемости по сравнению с предыдущими годами проведения занятий без презентаций на 15%.

## Список литературы

1 *Кузнецова, Н. Н.* Формирование графической компетентности студентов при изучении дисциплины «Начертательная геометрия и инженерная графика»/Сборник статей межфакультетской учебно-методической конференции «Компетентностно-ориентированные подходы к вопросам подготовки обучающихся», - Краснодар: ФГБОУ ВПО КубГАУ, 2014.- С. 390-392

2. *Кузнецова, Н. Н.* Переход к новым образовательным технологиям по дисциплине «Инженерная графика» для обучения студентов

факультета перерабатывающих технологий/ Сборник тезисов межфакультетской учебно-методической конференции «Инновационные технологии в учебном процессе как ресурс повышения уровня подготовки специалистов», - Краснодар: ФГБОУ ВПО КубГАУ, 2013.- С. 337-340.

3. *Лаврентьев Г.В., Лаврентьева Н.Б., Неудахина Н.А.* Инновационные обучающие технологии в профессиональной подготовке специалистов. Часть 2 – Барнаул: Издательство Алтайского Государственного Университета, 2004 г.С. 203.

## REALIZATION OF THE MODERN EDUCATIONAL TECHNOLOGIES IN THE LEARNING PROCESS OF GRAPHICS SPECIALISTS TRAINING IN THE MECHANICAL ENGINEERING SPHERE

**Kuznetsova N. N.**, (Engineering), e-mail: natalya_kuznecova_123@mail.ru
**Marchenko A. Yu.**, C.Sc., (Engineering), e-mail: ipmarchenko@rambler.ru
**Serga G. V.**, D.Sc., (Engineering), e-mail: serga-georgv@mail.ru

Kuban State Agricultural University, 13 Kalinina Street, 350044 Krasnodar, Russia

**Abstract:** The article examines the teaching descriptive geometry and engineering graphics in the Kuban State University, higher-motivation of students to obtain needed competence to adopt competently compensation-drawings. For lectures and laboratory classes in the department of descriptive geometry and graphics were developed multimedia courses with animation for all studied subjects, educational presentations that reveal the specifics of the discipline into account peculiarities of the educational process of learning in the Kuban State Agrarian University. The use of multimedia development at the Department of Descriptive Geometry and Graphics showed an increase of performance results compared to the previous years of employment without presentation. It indicates that the use of multimedia lectures and laboratory exercises improves the efficiency and quality of education, as well as gives an opportunity to a greater extent to explain the learning material for students.

**Keywords:** motivation to learn, intensification of training, adaptation of freshmen.

**УДК 378.14**

# СОЗДАНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ УЧЕБНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЦЕНТРОВ (НА МАТЕРИАЛАХ АЛТГТУ)

*А. А. СИТНИКОВ[1], доктор техн. наук, профессор,*
*В. А. БОРОДИН[1], доктор экон. наук, профессор,*
*М. И. МАРКОВА[1], канд. техн. наук, доцент*
*Г. А. РОЗИНА[1], аспирант АлтГТУ*
([1]*АлтГТУ, г. Барнаул, Россия*)

Розина Г.А. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
ФГБУ ВПО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»
e-mail: rozina128@mail.ru

**Аннотация:** Предложенная модель совершенствования образования в области машиностроения предполагает создание в техническом университете учебно-производственного центра (УПЦ) на базе промышленных предприятий машиностроительного комплекса Алтайского края. Создание УПЦ позволит решить проблему практико-ориентированной подготовки квалифицированных инженерно-технических кадров машиностроительной отрасли, отвечающих требованиям реальных работодателей.

**Ключевые слова:** учебно-производственный центр, практико-ориентированная подготовка инженерных кадров, машиностроительный комплекс

**Введение**

В настоящее время российская система образования находится в условиях постоянного реформирования. Старые образовательные подходы плохо работают в современных экономических условиях, а новые подходы все еще находятся на стадии формирования.

В условиях инновационной экономики особое значение придается формированию высококвалифицированных специалистов, ориентированных на потребность предприятий реального сектора экономики. Этот тезис прослеживается во многих нормативно-правовых документах, определяющих вектор развития России на перспективу: Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года, Основные направления деятельности Правительства РФ на период до 2018 года и другие.

Президент России В.В. Путин многократно упоминает о практико-ориентированной системе подготовки инженерных кадров в своих выступлениях: «…Не каждый вуз готов работать по-современному, учить так, чтобы у выпускника оставались не только диплом, но и нужные знания и профессиональные навыки, которые он может использовать в своей практической деятельности после окончания высшего учебного заведения…Это абсолютно принципиальное требование для вузов, готовящих специалистов – и прежде всего инженерно-технического профиля [1].»

Таким образом, в современных условиях образование в области машиностроения должно быть направлено на подготовку специалистов, обладающих комплексом знаний, умений и компетенций, отвечающих требованиям работодателей и необходимых для инновационного развития машиностроительного комплекса.

Целью исследования, описанного в рамках данной работы, является совершенствование системы подготовки инженерных кадров в области машиностроения путем создания на базе Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (АлтГТУ) и промышленных предприятий машиностроительного комплекса Алтайского края учебно-производственного центра «Машиностроительные технологии».

**Теория**

Инновации в технике и технологиях в настоящее время формируются, как правило, на мультидисциплинарной основе в результате применения знаний из разных научных областей. Комбинация фундаментальных и прикладных знаний, современных технологий, а, главное, их использование эффективным образом в практических целях становится главной задачей инженера в его инновационной деятельности.

По мнению работодателей, современный инженер должен обладать сформированным инновационным мышлением и высокой креативностью; уметь использовать методы и средства самостоятельной организации профессионального роста; владеть интегрированными междисциплинарными знаниями и быть способным работать в команде над проектами, взаимодействовать с экспертами в различных предмет-

ных областях; владеть практическим опытом разработки и внедрения исследовательских, конструкторских, экономических, экологических и других решений, научными основами и методами трансфера технологий.

На сегодняшний день отраслевая принадлежность подготовленных специалистов, структура выпускников вузов, их профессиональный состав и уровень подготовки плохо соотносится с существующей на рынке труда Алтайского края ситуацией.

Так, на рынке труда Алтайского края, по данным управления Алтайского края по труду и социальной защите, в отрасли обрабатывающие производства спрос на трудовые ресурсы в 2 раза превышает предложение, то есть возникает ситуация дефицита квалифицированных инженерных кадров.

Доминирующее положение в структуре промышленности Алтайского края занимают обрабатывающие производства (79,4%). Предприятия машиностроительного комплекса в структуре обрабатывающей промышленности занимают 21,2%.

АлтГТУ в системе подготовки кадров для предприятий машиностроительного комплекса играет ключевую роль, так как доля студентов, обучающихся по УГНС «Металлургия, машиностроение и металлообработка» составляет 76,96% от общего контингента студентов, обучающихся по данной УГНС в регионе.

В данной ситуации одной из важнейших задач системы образования АлтГТУ является адаптация к рыночным изменениям, а именно обеспечение работодателя специалистами, удовлетворяющими его потребностям, включающим в себя владение не только высокими теоретическими знаниями, но и обладание особыми компетенциями, позволяющими эффективно применять теоретические знания на практике, нестандартно подходить к решению актуальных задач.

Одним из условий качественной подготовки специалистов в области машиностроения становится не просто взаимодействие университета с работодателями, а их вовлечение (работодателей) в подготовку кадров на протяжении всего учебного процесса. Подобную линию взаимодействия можно выстроить путем создания учебно-производственного центра.

Учебно-производственный центр (УПЦ) – подразделение университета, созданное на предприятии (предприятиях определенной отрасли), функционирующее в тесном взаимодействии с выпускающей кафедрой (кафедрами) университета, обеспечивающей подготовку по данной образовательной программе (по нескольким родственным образовательным программам, принадлежащим, как правило, одной УГНС) [2].

В соответствии с Порядком создания профессиональными образовательными организациями и образовательными организациями высшего образования кафедр и иных структурных подразделений, обеспечивающих практическую подготовку обучающихся, на базе иных организаций, осуществляющих деятельность по профилю соответствующей образовательной программы, утвержденным приказом Минобрнауки России от 14.08.2013 № 958, УПЦ создается при соблюдении следующих условий:

a) соответствие реализуемой образовательной организацией образовательной программы профилю деятельности организации (предприятия);

b) наличие имущества, необходимого для достижения целей деятельности структурного подразделения;

c) обеспечение проведения практики, практических занятий, семинаров, лабораторных практикумов и иных видов учебной деятельности, предусмотренных учебным планом, в структурном подразделении;

d) обеспечение организацией (предприятием) условий для подготовки обучающимися выпускных квалификационных работ и иных видов работ, предусмотренных образовательной программой, в том числе участие в формировании тем выпускных квалификационных работ и иных работ, обеспечение научного руководства и рецензированию выпускных квалификационных работ и иных работ, безвозмездное предоставление обучающимся доступа к информации, необходимой для подготовки выпускных квалификационных работ;

e) создание безопасных условий обучения.

Основаниями создания УПЦ являются:

1. решение учёного совета университета о создании УПЦ;
2. приказ ректора о создании УПЦ;
3. договор о создании УПЦ, заключенный между университетом и предприятием (предприятиями).

УПЦ не наделяется полномочиями юридического лица.

Финансирование основной деятельности УПЦ осуществляется по смете, утвержденной всеми учредителями УПЦ.

УПЦ в своей деятельности руководствуется Федеральным законом от 29 декабря 2012 г. N 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации», иными федеральными законами, нормативными правовыми актами Президента Российской Федерации и Правительства Российской Федерации, учредительными документами образовательной организации, положением об УПЦ.

Основополагающей целью деятельности УПЦ является практико-ориентированная подготовка высококвалифицированных инженерно-

технических кадров для работы на промышленных предприятиях региона в соответствии с их отраслевой спецификой.

В соответствии с поставленной целью УПЦ в своей деятельности решает следующие задачи:

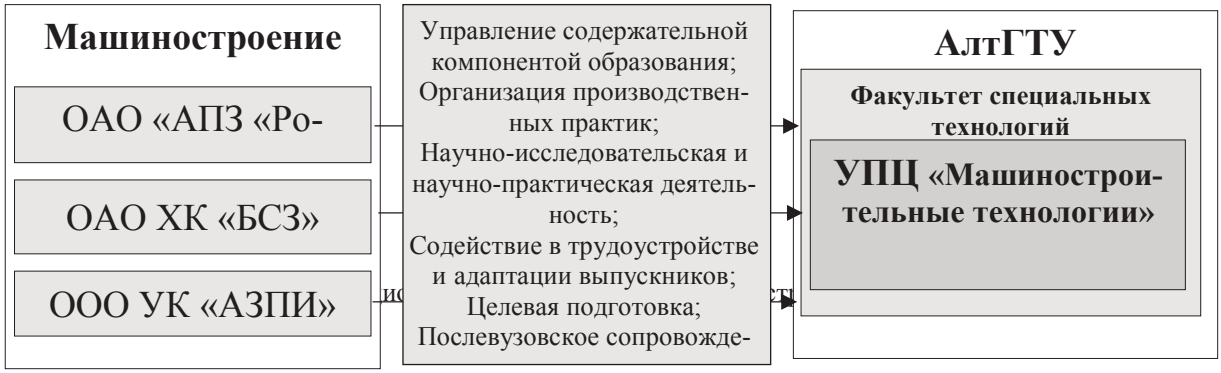
- анализ и прогнозирование кадровых потребностей региона в квалифицированных специалистах соответствующего профиля;
- привлечение работников промышленных предприятий к формированию и реализации учебных рабочих планов подготовки специалистов, бакалавров, магистров;
- корректировку контрольных цифр приема абитуриентов с учетом потребности промышленных предприятий в специалистах;
- приобретение студентами практических навыков, необходимых для дальнейшей профессиональной деятельности;
- реализация адресной (целевой) подготовки специалистов для предприятий;
- организация и проведение прикладных научно-исследовательских работ для нужд промышленных предприятий, а также апробация новых технических решений;
- обеспечение дополнительного образования и повышения квалификации работников предприятий и учебных заведений;
- содействие в трудоустройстве и профессиональная адаптация выпускников к работе на промышленных предприятиях соответствующей специфики [2].

**Результаты и обсуждение**

На сегодняшний день в АлтГТУ на базе ОАО «Алтайский приборостроительный завод «Ротор», ОАО Холдинговая компания «Барнаульский станкостроительный завод» и ООО УК «Алтайский завод прецизионных изделий» создан УПЦ «Машиностроительные технологии».

Стоит отметить, что созданию УПЦ «Машиностроительные технологии» предшествовало длительное сотрудничество АлтГТУ с промышленными предприятиями машиностроительной отрасли. Сотрудничество проявлялось в форме прохождения студентами АлтГТУ на данных предприятиях производственных и преддипломных практик; выполнение курсовых и дипломных проектов на темы, предложенные предприятиями с учетом своих интересов и потребностей; привлечение специалистов предприятий к руководству дипломными проектами и т.д.

Схематично, организационная структура УПЦ «Машиностроительные технологии» представлена на рисунке.




**Выводы**

1. На государственном уровне определен вектор развития системы образования в сторону подготовки специалистов, обладающих комплексом знаний, умений и компетенций, отвечающих требованиям работодателей и необходимых для инновационного развития машиностроительного комплекса.
2. На сегодняшний день отраслевая принадлежность подготовленных специалистов, структура выпускников вузов, их профессиональный состав и уровень подготовки плохо соотносится с существующей на рынке труда Алтайского края ситуацией.
3. Основополагающей целью деятельности УПЦ «Машиностроительные технологии» является практико-ориентированная подготовка высококвалифицированных инженерно-технических кадров для работы на промышленных предприятиях машиностроительного комплекса Алтайского края.

## Список литературы

1. Стенограмма выступления Президента России В.В. Путина/ Стенографический отчёт X съезда Российского союза ректоров 30.10.2014 - Режим доступа: http://www.kremlin.ru
2. *Розина Г.А., Бородин В.А., Марков А.М., Ганеман Е.К.* Создание учебно-производственных центов на базе промышленных предприятий Алтайского края // Вестник Алтайской науки. – Воронеж, 2015. – С.42-50

# DEVELOPMENT OF PRODUCTION-AND-TRAINING CENTRE FOR MACHINE BUILDING (BASED ON ALTSTU)

**Sitnikov A. A.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: sitalan@mail.ru
**Borodin V. A.**, D.Sc. (Economy), Professor, e-mail: vab4788@mail.ru
**Markova M. I.**, C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: margarita-markova@inbox.ru
**Rozina G. A.**, P.G. (Economy), e-mail: rozina128@mail.ru

Polzunov Altai State Technical, 46 street Lenin, Barnaul, 656038, Russian Federation

**Abstract:** The proposed model of education improvement in machine building presupposes development of production-and training centre in the University based on manufacturing plants of machine building complexes of Altai Krai. The development of production-and-training centre allows solving the problem of practice-oriented training of qualified specialists in engineering of machine building industry meeting the requirements of the employers.

**Keywords:** production-and-training centre, practice-oriented training of specialists in engineering, machine building complex

**УДК 378.147:004.032.6]:514.18**

# ЦЕЛОСТНАЯ СИСТЕМА ОБРАЗОВАНИЯ, КАК НАЧАЛО И ГАРАНТ МОДЕРНИЗАЦИИ СТРАНЫ

*С. Б. МАКСЮКОВА, канд. филос. наук, доцент,*
*Д. С. ТРУХМАНОВ, магистр техники и технологии, ст. преп.*

Трухманов Д.С. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
E-mail: trizart@mail.ru

**Аннотация:** Статья посвящена актуальной проблеме влияния НТП, в частности, техники на цивилизацию. Авторы показывают неоднозначность этого взаимодействия, акцентированного «человеческим фактором», зависящим от духовности субъекта – «технотворца» и «техноэксплуататора». В статье аргументированно подняты вопросы о необходимости восстановления лучших традиций российской системы образования, как условия и гаранта модернизации страны.

**Ключевые слова**: техника, духовность, гуманистические ценности, ответственность, знание, сознание, образование.

*«Если я, вместо того, чтобы оперировать каждый вечер, начну у себя в квартире петь хором, у меня настанет разруха. Если я, входя в уборную, начну, извините за выражение, мочиться мимо унитаза и то же самое будут делать Зина и Дарья Петровна, в уборной начнется разруха. Следовательно, разруха не в клозетах, а в головах. Значит, когда эти баритоны кричат «бей разруху!» — Я смеюсь. Клянусь вам, мне смешно! Это означает, что каждый из них должен лупить себя по затылку!».*

***Михаил Булгаков, «Собачье сердце».***

Современный НТП, направленный, казалось бы, на повышение эффективности человеческой деятельности и улучшение «бытия» людей, не имеет однозначной оценки. Так немецкие философы М. Хайдеггер и К. Ясперс утверждали, что техника не только порабощает человека, разрушает его духовность, но и ведет к гибели цивилизации. Для нас, преподавателей технических вузов, постановка и решение этих вопросов не только актуально, но и имеет судьбоносное значение как для нашего настоящего, так и для будущего.

Для выяснения проблемы о влиянии техники на цивилизацию нам необходимо обратиться к вопросу о природе самой техники и её взаимодействии с цивилизацией. В современной литературе по философии науки под техникой понимается «исторически развивающаяся совокупность созданных людьми средств (орудий, устройств, механизмов и т.п.), которые позволяют человечеству использовать естественные и искусственные материалы для удовлетворения своих потребностей» [1]. То есть, технику следует относить к искусственным объектам, созданным разумом и трудом человека. Следовательно, технологический уровень, степень безопасности применения техники для окружающей среды и самого человека, т.е. позитивного или негативного влияния ее на цивилизацию зависит от уровня сознания технического творца, от его кругозора, картины мира, его отношения к экосреде, другим людям, самому себе, то есть, его гуманистических ценностей, определяющихся духовностью человека. Под «духовностью» мы понимаем человеческое в человеке, что поднимает его над животной природой и делает его собственно человеком. То есть, духовность определяет личностное ядро человека. И знание о своем духовном начале формировалось и развивалось вместе с его осознанием себя как субъекта деятельности, отношениями с другими и миром.

С секуляризацией религии, начиная с эпохи Просвещения, знания о духовном начале человека и духовных ценностях перешли в гуманитарные дисциплины, к которым мы относим философия, историю, психологию и др. Однако, состояние образования в нашей стране в связи с резким сокращением образовательных программ по фундаментальным научным дисциплинам (как естественным, так и гуманитарным) не позволяет обучающейся молодежи ни познакомиться с гуманитарным знанием о высших духовных ценностях, ни тем более, освоить его.

Если мы проанализируем причины техногенных аварий и катастроф (например, падение «Протона», «Прогресса», аварии на Чернобыльской и Фукусимской АЭС и т.д.), то увидим, что

везде и всюду в таких случаях называется «человеческий фактор»: «недорассчитали», «недопроверили», «недоконтролировали», понадеялись на «авось», а то и вовсе пошли на авантюристические эксперименты. Что это – корыстный сиюминутный интерес, или нарушение технических норм по причине невежества, или непреднамеренные просчеты? Под всеми названными (и неназванными здесь) причинами аварий и катастроф можно подвести жирную черту и поставить общий диагноз: безответственность. Т.е. отсутствие элементарной ответственности у инженерно-технического персонала перед заказчиком (страной, народом), перед самим собой и перед миром. Ответственность как черта духовности субъекта социальной деятельности, формировалась в ходе исторического развития человека, под воздействием социального опыта, наработанного в процессе общественной жизни и фиксируемого такими формами общественного сознания, как мифология, религия (в особенности христианство, с его таинством исповеди, непосредственно формирующей личность христианина, как субъекта, ответственного за свои поступки, поведение, действия, и даже свои мысли). В дальнейшем, общественным сознанием и социальной практикой, помимо нравственных форм ответственности, в сферах хозяйственно-экономической, политической и правовой были выработаны уже рациональные норма и правила взаимодействия людей в виде легитимных законов, кодексов, уставов и т.д. В обществе осуществлялась социализация личности. В процессе образования, воспитания формировалось осознание принадлежности к социуму, и, как следствие, – активная жизненная позиция, направленная на созидание и защиту своего отечества (заметим, независимо от социального строя).

Как об этом говорилось выше, НТП и, в частности, техника, функционально направлены на улучшение быта людей, удовлетворение материальных потребностей человека (физических и душевных), которые, как известно экономистам, никогда вполне не могут быть удовлетворены (закон возрастающих потребностей). И вся система нашего образования сегодня нацелена на подготовку потребителей и «менеджеров» по реализации потребностей. Эта система не предусматривает развитие духовности, ведь люди высокой духовности, как правило, не вписываются в потребительский рынок, не ставят целью своей жизни достижения материального изобилия, власти и т.п. Они реализуют свои способности в служении людям, истине, красоте, Богу.

Современное общество знания нуждается в профессионалах, способных не только извлекать информацию из Интернета и работать по стандартным программам, но обладающих багажом фундаментальных знаний как по своей специальности, так и по естественным и социально-гуманитарным наукам, что позволит им осуществлять предметный анализ и принимать ответственные решения в сложных ситуациях. Современный инженер должен иметь определенные знания, уметь активно действовать, используя информационные ресурсы, гибко адаптироваться к изменяющимся технологиям и быстро принимать решения. Всему этому необходимо учить, начиная с первого курса. Важно, чтобы студент не только овладел определенной суммой знаний, но и научился самостоятельно их приобретать, работать с информацией, овладел способами познавательной деятельности, которые в дальнейшем мог бы применять в условиях непрерывного самообразования. Самостоятельное приобретение знаний не должно носить пассивный характер, напротив, студент с самого начала должен быть вовлечен в активную познавательную деятельность, не ограничивающуюся овладением знаниями, но непременно предусматривающую их применение для решения разнообразных проблем своей практической деятельности.

Выработка любого навыка первоначально связана с дискомфортом, недовольством, излишним напряжением, ошибками и т.д. Но человек, который не научился эти вещи преодолевать – никогда ничему не научится. Однако, когда навык сформируется, это напряжение спадет, Вы просто привыкните действовать подобным образом. Вспомните, как Вы учились читать и писать!

Следует показать обучающимся, что далеко не всегда в жизни мы делаем то, что хотим или что нам интересно. Задача не в том, чтобы всегда вызывать у студентов мотив, не в том, чтобы всегда вызывать у него интерес, а скорее наоборот – нужно формировать навык действия вопреки мотиву, преодолевая себя. Отметим, что это является основным минусом популярных на сегодняшний день т.н. игровых форм обучения. Конечно, определенные элементы подобного обучения, как мы считаем, не только важны, но и обязательны. Однако, во всем нужно знать меру. Лекции не должны превращаться в шоу, а процесс обучения в бесконечную пиар-акцию той или иной учебной дисциплины. Наглядная демонстрация, яркие интересные жизненные примеры – безусловно, очень положительно сказываются на всем обучении. Но процесс познания не начнется без прикладывания усилий, без преодоления себя, без проработки «скучной» теории, без чтения книг.

Для этого, мы считаем необходимым и первоочередным воспитание в молодом поколении волевых качеств, которые позволят им не слепо следовать за своими желаниями и мотивами, носящими скорее физиологический характер, а

поступать вопреки мотивам и в отсутствии их. Отметим, что развитие воли всегда контекстно, всегда привязано к определенному виду деятельности, а зачастую и к отдельно взятому «раздражителю». Но приобретение подобных волевых качеств и четкое понимание их роли позволит любому человек адаптироваться к новым технологиям и не остаться на обочине современного быстроизменяющегося общества.

Первыми шагами в этом могут послужить известные всем, но по какой-то причине в большинстве случаев игнорируемые механизмы, такие как:

- Отказ от практики автоматической простановки экзаменов и зачетов по результатам работы студента в течение семестра, согласно балльной системе оценок, согласно результатам расчета некого алгоритма и пр. Поскольку подобная практика многих, даже лучших студентов может привести к работе по лекалу, по образцу; к отказу от вдумчивого глубокого изучения теоретического материала, и, как следствие, потере интеллектуального потенциала и клиповому мышлению.
- В принципе отказ от системы, требующей простановки контрольных точек и контроля за посещаемостью. Если студент считает, что в той или иной теме он разбирается лучше преподавателя, или данные вопросы никак не затрагивают сферу его профессиональных интересов – это его право. Экзамен покажет кто прав. Любого рода чрезмерный контроль приводит к инфантилизму, поэтому, чем раньше молодое поколение начнет осознавать ответственность за своё поведение и поступки, тем лучше. За рубежом есть положительные примеры, подобных «экспериментов» с образовательным процессом, но этой теме мы планируем посвятить отдельную статью.
- Устранение привилегированных групп студентов (точнее не самых групп, а их негласных «привилегий»), будь то творческие коллективы, активисты, студенческие советы и пр., которых зачастую не чураются проталкивать вышестоящее руководство, в лице заведующих кафедр, сотрудников дирекций и деканатов. Во главе угла должен стоять образовательный процесс, со всеми вытекающими отсюда последствиями. А при наличии, свободного времени студент может посвящать себя и другой деятельности, которая, само собой должны поощряться различными премиями и стипендиями. Но никак не наоборот.

Конечно, многие из перечисленных пунктов зависят от личностных качеств и убеждений отдельно взятого преподавателя, и контроль за ними может быть воспринят как вмешательство в авторскую методику обучения. Однако, осуществление данного контроля в той или иной форме считаем объективно необходимым. Следует с первого дня обучения дать студенту понять, что его цель – это получение знаний и овладение специальностью, и только эти аспекты и следует контролировать, только по этим аспектам следует выдавать как различного рода привилегии, так и наказания (начиная от разного рода выговоров и закачивание отчислением).

Европизация привела к переориентации ценностей, что также нанесло урон системе образования в целом. Положения болонской системы требуют мобильности и самообучения. Но далеко не каждый хочет и способен учить себя сам. Многие студенты просто не понимают чему их учат, зачем и что им это даст. Они не знают, как смогут применить полученные навыки, кем смогут работать. У них нет цели стать специалистами и большинство из них не хочет, и никогда не будет работать по выбранной им специальности. Их цель – получить заветный диплом, и первый шаг для этого – долгожданный «уд.» или «хор.» в зачетной книжке. Ни о каком профессиональном росте, и ни о каких знаниях, само собой в данном случае речи не идет.

По данным исследований, четвертая часть молодежи выполняет работу, не требующую вообще никакого образования [4], причем большинство из них имеет или готовится к получению высшего образования. Образование, полученное в учебном заведении, соответствует выполняемой работе у двух третей молодых людей, а полученные ранее знания и опыт использует лишь половина [4]. Масштабные исследования положения работников на рынке труда подтверждают, что «многие обладатели профессионального образования не находят для себя работы, требующей уже имеющегося у них образования» [7]. Естественно, что не найдя достойного применения своим навыкам на родине, молодые квалифицированные специалисты уезжают работать заграницу. От 53% до 65% студентов вузов получают не ту профессию, о которой мечтали, заканчивая школу, причем с курсом растет число разочарованных в профессиональном выборе, что побуждает студентов (в среднем около 25% опрошенных) ориентироваться на получение второго высшего образования [5].

Стоит отметить, что у обучающихся, за редким исключением, нет стимулов к приобретению знаний поскольку в нашем обществе сегодня не престижно быть высокообразованным, интеллектуально развитым, культурным человеком. А продление же периода ученичества в большинстве случаев вызвано скорее инфантилизмом желанием «отсрочить» вступление во взрослую самостоятельную жизнь. Речь идёт об изменении ценностей молодого поколения в сторону лёгкой жизни, в своё удовольствие, без трудовых усилий, без всякого напряжения, без забот ни о себе, ни о ближних и дальних. В этих

условиях культивировать стремление к получению качественного образования оказывается делом неперспективным, да и не вполне обоснованным морально.

Сегодня решается судьба молодого поколения, а значит – будущего России. И решать её надо во всей системе формирования человека – воспитания, образования, общественной идеологии, где нравственность, знания, стремления к красоте и творческому поиску органически связаны и не существуют порознь, как не существуют отдельно добро без воли, истины без ума или красоты без чувств человека. Без такого полноценного человека невозможно «общество знания», к которому мы стремимся. И отдельными «оазисами» науки вроде «Сколково», организованного нашим правительством, такую проблему не решить. Необходима радикальная реформа нашей образовательной системы, а не те, которые сегодня проводит наше министерство образования по пути удешевления образовательного процесса.

К счастью, наш народный дух сохраняет еще соборный архетип, унаследованный от наших далеких предков, т.е. родовая память о коллективной ответственности. Нам нужна государственная воля, направленная на организацию общественных усилий для восстановления целостной системы образования и воспитание наших будущих специалистов, ориентированных и способных к созиданию техники, не разрушающей духовность, а способствующей её развитию, как высшей цели нашего общества и человечества. Для реального достижения этой цели, нам необходимо, как пишет известный писатель, ученый обществовед Михаил Антонов, «в числе первоочередных задач: совершенствование системы образования и воспитания молодежи за счет восстановления на современной основе того ценного, что было в советской системе, признанной когда-то ООН лучшей в мире. Направлена система образования должна быть на подготовку не «офисного планктона», а патриотов и специалистов реально дела» [2].

## Список литературы:


1. *Лешкевич Т.Г.* Философия науки: Учебное пособие для аспирантов и соискателей учёной степени М., 2005. 272 с.
2. *Антонов М.* Новая Россия и ельцинизм несовместимы // Литературная газета. 2015. № 13 (6503). 1–7 апр. С. 3.
3. *Семенова Л.А.* Кадровый потенциал постсоветской России: потери, обретения, проблемы. Социологический анализ // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. Saarbruken, Germany. 2014.
4. *Константиновский Д.Л.* Качественное образование: ресурс и его использование // Социология и общество: глобальные вызовы и региональное развитие [Электронный ресурс]: Материалы IV Очередного Всероссийского социологического конгресса / РОС, ИС РАН, АН РБ, ИСППИ. М.: РОС, 2012. 1 CD ROM. URL: http://www.isras.ru/files/File/congress2012/part39.pdf. С. 5979-5988.
5. *Семенова Л.А.* Вхождение в профессию и некоторые социально-профессиональные ориентации молодежи // Научный вестник Волгоградской академии государственной службы. Серия: Политология и социология (Выпуск 1). Издательство ВАГС. 2009. №1. С. 41-49.
6. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru/bgd/free/b04_03/lssWWW.ex/Stg/d02/71.htm
7. Российский работник: образование, профессия, квалификация / Под ред. В.Е.Гимпельсона, Р.И.Капелюшникова. / Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2011. 561 с.


# HOLISTIC EDUCATION SYSTEM AS THE BEGINNING OF THE COUNTRY'S MODERNIZATION AND ITS GUARANTEE


**Maksyukova S. B.**, C.Sc. (Philosophy), e-mail: msbphil@mail.ru
**Trukhmanov D. S.**, M.Sc. (Engineering), e-mail: trizart@mail.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation



**Abstract**: The article is devoted to the actual problem of influence of scientific and technical progress, in particular, technology on civilization. The authors show the ambiguity of this interaction, accented "human factor", depending on the personal qualities of the subject - "technology-creator" and "technology-user." In the article raises issues and provides their arguments about the need to restore the best traditions of the Russian educational system as the necessary conditions the country's modernization and its guarantees.



**Keywords:** technique, humanity, humanistic values, responsibility, knowledge, awareness, education.

**УДК.37:338.07:658.562**

# УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*В. А. ПОЛЕТАЕВ, доктор техн. наук, профессор*
*И. В. ЧИЧЕРИН, кандидат техн. наук, доцент*
*(КузГТУ, Кемерово)*

**Аннотация:** рассматриваются вопросы, связанные с качеством подготовки специалиста и с проектированием вузовской системы управления качеством образовательного процесса (СУК ОП).

Реализация СУК ОП основана на интеграции этапов жизненного цикла образовательного процесса с использованием единой информационной среды.

Предлагается реализовать дидактическую систему инженерного образования, базирующуюся на использовании CAD/CAM/CAE/PDM-системы (проектирование, подготовка производства и конструирования, управление инженерными данными) в качестве единого средства обучения

**Ключевые слова:** подготовки специалиста, система управления качеством образовательного процесса, жизненный цикл образовательного процесса, инженерное образование

Интеллектуальный потенциал человека – главное богатство страны в наступающем информационно-технологическом обществе. В эпоху глобальной перестройки общества Россия оказалась перед необходимостью выработки принципиально новой стратегии развития образования, создания современной образовательной индустрии.

Образование рассматривается как один их решающих факторов формирования интеллектуальных ресурсов, обеспечения высшего уровня развития производственных сил. В этой связи резко обострилась актуальность и необходимость решения проблем качества подготовки специалиста.

Основой решения проблемы качества образования является проектирование и внедрение системы качества образовательного процесса (ОП). Предназначение такой системы состоит в объединении и интеграции организационных, методических, научных, кадровых, управляющих усилий и ресурсов в интересах достижения высокого уровня качества образования, отвечающую соответствующим федеральным государственным образовательным стандартам (ФГОС).

Актуальность рассматриваемого вопроса обуславливается наличием ряда противоречий [1]:

- между высокими темпами преобразований общества и медленным развитием в высшей школе; доминированием в ней традиционных укладов и подходов;
- между современными требованиями к качеству и реализуемыми установками в управлении, рассчитанными на использование частных, автономных мер;
- между необходимостью осуществления мониторинга качества образования и несовершенством оценочных методик и процедур, отсутствием в образовании единой методологии измерений качественных параметров объектов и процессов;
- между высокими требованиями к качеству образования, закрепленных в ФГОС и недостаточным ресурсным (материального, кадрового) обеспечением [2].

Несмотря на свою специфику, российское образование развивается в русле мирового образовательного процесса и имеет те же проблемы.

Несоответствие между содержанием образования и современным уровнем развития знаний, между содержанием образования и реальными образовательными запросами являются сутью всемирного кризиса в образовании. Реальность такова, что образовательные системы адаптируются к новым условиям крайне медленно и не успевают за преобразованиями в обществе. В России это усугубляется отсутствием достаточных образовательных ресурсов и этот недостаток является лимитирующим в развитии российского образования. Все это обусловит кризис старой системы энциклопедического образования. В ситуации фактического краха унифицированной системы образования в России и появлении реальных признаков диверсификации (рост разнообразия) встает острейшая задача сохранения единых стандартов ВПО.

Считается, что аттестация, аккредитация и лицензирование, высших учебных заведений должны опираться на некоторые универсальные критерии, позволяющие избежать как насильственной унификации, так и потери общих важнейших ориентиров в образовании.

Конвертирование, в отличие от диверсификации играет роль стабилизирующего фактора. С ним непосредственно связана идея создания ФГОС, выполняющих функции обеспечения обязательного минимума содержания основных образовательных программ, установления требований к уровню подготовки выпускника.

Анализ состояния качества образования в России осуществляется по следующим направлениям:

1. По внешнему социальному качеству. Сфера образования рассматривается как отрасль, обеспечивающая воспроизводство интеллектуальных ресурсов в обществе. Используются индикаторы образовательного ценза населения, массовости образования, доступности образования, образовательного интеллектуального качества населения и т.п.

2. По внутреннему качеству образования (институционное качество) используются индикаторы качества подготовки выпускников, качества содержания образования, кадрового потенциала, материально-технической базы и др.

Сегодня образовательная сфера все больше воспринимается в общественном сознании как сфера услуг (услуг специфических, связанных с воспроизводством интеллектуальных ресурсов).

Следовательно, и подходы к обеспечению качества образования должны быть такими же, как и сложившиеся в мировой практике применительно к различным областям жизнедеятельности.

Прежде всего речь идет об освоении концепции Всеобщего управления качеством (Total Quality Management), стандартов в области качества Международной организации по стандартизации (ИСО).

Важное методологическое значение для теории принцип управления качеством образования имеет отечественный и зарубежный опыт в области материального производства. Эволюция управления качеством осуществлялась от элементарных операций проверки качества и испытания до систем управления качеством с принятием в 90-е годы концепции всеобщего управления качеством TQM, имеющей свое нормативное выражение в международных стандартах качества ИСО серии 9000. Эта концепция предусматривает всестороннее целенаправленное применение систем и методов управления качеством во всех сферах деятельности от исследований и разработок до послепродажного обслуживания. Концепция TQM является технологией руководства процессом повышения качества, а стандарты качества ИСО устанавливают термины и определения, в них даны процедуры разработки и внедрения системы качества, представлены методы управления (обеспечения) качеством основных и вспомогательных процессов, регламентируются процедуры самообследования по качеству и т.д. Таким образом, анализ эволюции отечественных и зарубежных систем управления качеством в области производства продукции и оказания услуг позволяет составить общее представление достижений в вопросах совершенствования качества, представление об основных направлениях дальнейшего развития систем, актуализировать полученные знания и опыт в аспектах ОП.

Для использования стандартов качества ИСО в практике образовательных учреждений необходима их некоторая адаптация [1]. Эта необходимость обусловлена особенностями ОП.

Некоторые из этих особенностей:

- потребители образовательных услуг (студенты) являются активными участниками (наряду с преподавателями) образовательной деятельности; в силу этого от их активности, позиции, мотивации, способности и прилагаемых усилий во многом зависит качество конечных результатов образовательных услуг;
- субъективная удовлетворенность обучаемых качеством образования не является единственным критерием для его оценки;
- требования индивидуализации обучения, стремление в максимальной степени раскрыть личностный интеллектуальный и творческий потенциалы обучаемых делает невозможным и нецелесообразным реализацию в полном объеме программно-целевого подхода к обучению, к освоению учебных программ; в данном случае ОП не может быть полностью технологизирован, управляться по типу "управление по отклонениям", это означает, что формирование качества всегда будет сопровождаться рядом неучтенных факторов, быть в некоторой степени неуправляемым. Столь существенные особенности ОП (образовательных услуг) должны находить свое отражение на всех этапах проектирования и внедрение систем качества, определять состав их элементов и характер связей между ними.

Наличие особенностей ОП и объектов обуславливает необходимость стандартизации понятийного аппарата. Оперировать терминами и определениями, приведенными в стандартах ИСО, не интерпретируя их соответствующим образом, не адаптируя в связи с установившимися в педагогике понятиями представляется не совсем правильным.

Прежде всего педагогической интерпретации требует термин "качество". В стандартах ИСО качество определяется как совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности. В образовательной деятельности установленными потребностями являются ФГОС. Предполагаемые потребности отражают мнения, запросы и ожидания, социальный заказ различных сословно-профессиональных групп общества вузу, потребности обучаемых в максимальном учете и реализации их личностного интеллектуального и творческого потенциала.

Большое значение для педагогической интерпретации и расширенного толкования термина "качество" имеет раскрытие его как философской и педагогической категории. Особенно

большое значение в этом плане имеет квалитология, как триединая наука, включающая себя теорию качества, теорию оценки качества и теорию управления качеством [3].

**В связи с этим предлагается следующее определение качества образования как совокупность его свойств, которая обуславливает способность удовлетворять социальные потребности в формировании и развитии личности в аспектах его обученности, воспитанности, выраженности социальных, психических и физических свойств [1].**

Международные стандарты ИСО серии 9000 трактуют систему качества организации как совокупность организационной структуры, процедур (методик), процессов и ресурсов. Система качества состоит из ряда элементов и функционирует посредством процессов. Для эффективности системы эти процессы и соответствующие ответственности, полномочия, методики и ресурсы следует определить и развернуть на постоянной основе.

Организационная структура – это динамическая система, образовавшаяся в результате возложения на отдельных представителей администрации вуза, профессорско-преподавательского состава, отдельные структурные единицы функций по управлению качества.

Процедуру можно определить как своеобразный алгоритм, определенным образом регламентированную последовательность действий, операций и воздействий в отношении факторов и условий, оказывающих влияние на качество образования.

В ОП среди множества рабочих процедур можно выделить:

- оценка качества ОП и объектов, квалиметрический мониторинг качества ОП;
- самообследование вуза по качеству ОП;
- выбор и принятие управленческих решений в отношении нормативного, программного, методического, кадрового обеспечения ОП.

Каждая процедура в ходе внедрения подлежит тщательной проработке, документированию и освоению руководителями и исполнителями работ. Ключевое значение в этом отношении имеет Руководство по качеству – документ, разрабатываемый вузом и фиксирующий принципы и правила деятельности по улучшению отдельных аспектов качества ОП (качество учебных планов и программ, качество подготовленности выпускников; качество преподавания и т.п.).

Руководство по качеству дополняется системой стандартов предприятия (стандартами системы качества) организационно-методические документы, устанавливающие единые нормы и правила документирования процедур по всем видам деятельности вуза и контроля за их выполнением с целью обеспечения функционирования системы качества.

На рис. 1 предлагается структурная схема алгоритма управления качеством ОП в вузе. Данная схема состоит из ряда логических и решающих блоков. Описанный алгоритм управления представляет собой базовый каркас, раскрывающий непрерывное и логически последовательное функционирование СУК ОП [1].

Качество образовательного процесса, как объект управления, проходит последовательные стадии своего формирования. Процесс его формирования можно разделить на несколько взаимосвязанных, но относительно самостоятельных управляемых этапов:

- Исследование потребностей, изучение запросов, анализ требований ГОС, уровня качества образования, собственных возможностей, ресурсов и потенциала.
- Проектирование и разработка учебных планов и рабочих программ, методических разработок. На этом этапе осуществляется разработка методических указаний, обучение ППС и УВП по новым программам, технологическая подготовка учебного процесса. Управление качеством осуществления на методическом (технологическом) уровне.
- Непосредственное осуществление ОП. В ходе него проекты и разработки воплощаются в реальной образовательной практике. Участники ОП получают необходимый опыт, имеют возможность реально сопоставить свои возможности, исходные представления и оценки с объективной реальностью.
- Реализация выпускниками своего личностного образовательного потенциала в послевузовской деятельности (период). Именно здесь возможно осуществить сбор и накопление информации в качестве результирующих, а не процессуальных (как на предыдущем этапе) параметров ОП, провести анализ степени воздействия на качество ОП тех или иных воздействий.

На рис. 2 комплексная система управления с охватом четырех этапов формирования качества ОП, представлена как многоконтурная иерархическая система [1]. Обратные связи (ОС) 1.1-1.4 обеспечивают требуемое управление на соответствующих этапах формирования качества, обратные связи уровней 2 и 3 решают задачи управления для взаимосвязанных этапов, обратная связь уровня 4 связывает выход процесса формирования качества с его входом, образуя замкнутый контур для обеспечения непрерывного контроля и управления качеством по всей цепи процесса формирования качества.

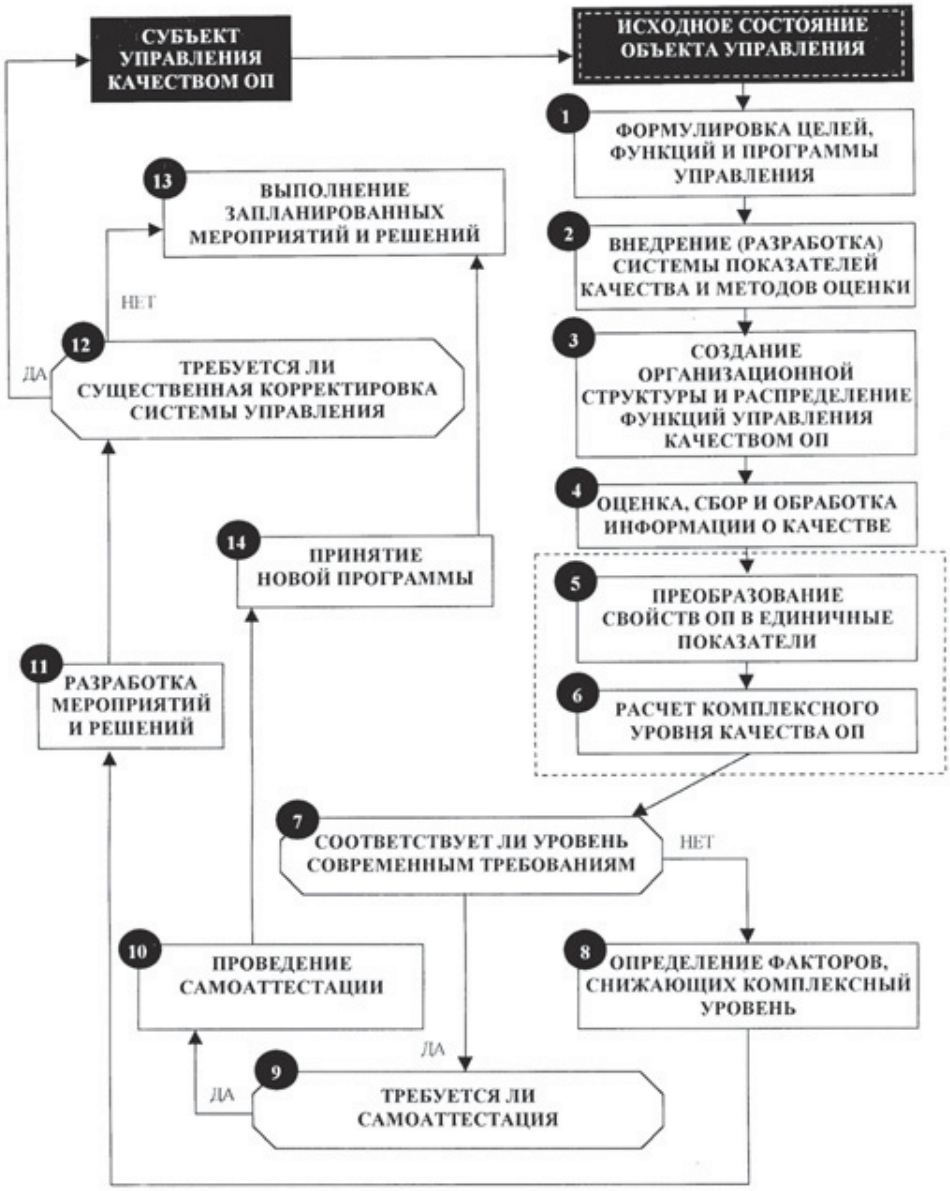



Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма управления качеством образовательного процесса

В зависимости от временных параметров управляемого процесса выделим входной, текущий, оперативный и выходной контроль. Входной контроль позволяет составить представление об исходном уровне качества ОП. Он обеспечивается функционированием ОС 1.1. Текущий контроль осуществляется посредством ОС 1.3 и ОС 1.4. Информация, поступающая по данным каналам, хотя и нечетко описывает состояние объекта управления и не ведет к изменению переменных на входе, однако является неоценимой в плане варьирования текущих воздействий на объект и отслеживания его "ответов" на них. Корректировки программы, техники и технологий таких воздействий.

Оперативный контроль, осуществляемый с использованием контура ОС3, связывает в единую аналитическую цепь ряд процессуальных характеристик ОП, текущих показателей состояния качества ОП, состав и комбинации переменных.

Выходной контроль (контроль по результирующим параметрам ОП) организуется по контуру ОС-4, но в усеченном виде может идти и по контурам обратной связи первого и второго уровня. Однако, только в первом случае он способствует установлению достаточно полной связи между входом и выходом управляемой системы. Итогом выходного контроля, как правило, являются крупные управленческие решения по смене показаний учебных планов и программ, переходу на новые технологии обучения и т.п.

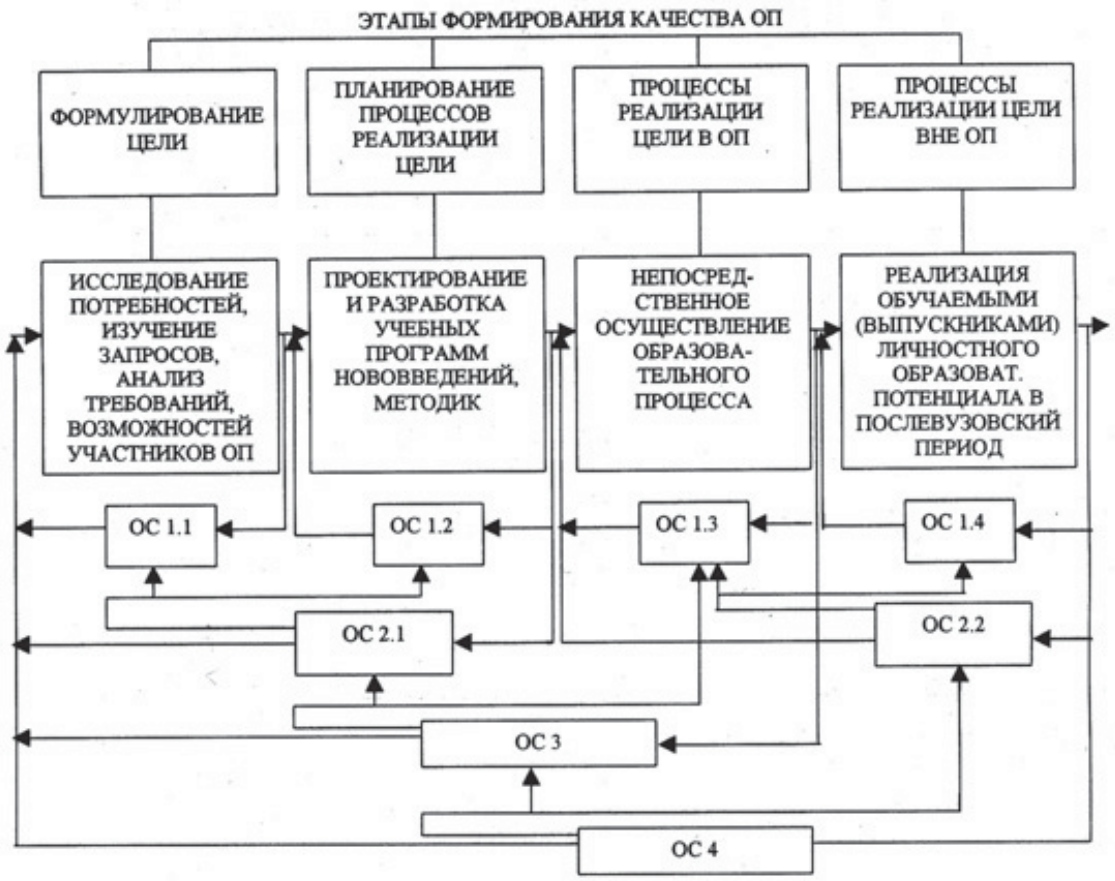



Рисунок 2 – Комплексная система управления качеством образовательного процесса (ОП)

Во всех четырех видах контроля используются различные показатели. При всем различии содержательных аспектов их использования на разных уровнях и этапах управления их объединяет общность критерия – общественно целесообразное качество ОП. Данная система показателей характеризует состояние входов и выходов различных педагогических процессов, образующих в совокупности процесс формирования качества ОП. Как оценка состояний, так и степень управления этими состояниями различны для разных этапов процесса формирования качества, поскольку определяются только теми процессами, которые составляют содержание того или иного этапа.

При проектировании СУК ОП можно выделить следующие этапы:

1. Изучение исходных данных. При выполнении этого этапа:

- определение ресурсных возможностей вуза;
- установление противоречий образовательный системы вуза;
- анализ качества функционирования и результатов ОП;
- изучение качества и эффективности функционирования всех структур управления ОП;
- построение модели качества ОП.

Построение модели качества ОП сводится к описанию основных факторов, определяющих качество ОП. Целесообразно выразить уровень проявления отдельных факторов в количественных величинах.

2. Проектная разработка модели СУК ОП:

- оптимизация и проектирование основных компонентов СУК ОП (целевого, мотивационно-стимулирующего, педагогического, организационного, содержательного, нормативного, критериального, информационного;
- разработка модели процесса управления качеством ОП;
- проектирование механизма практического внедрения СУК ОП;
- технико-экономическое обоснование спроектированной системы;
- составление пространственно-временного графика внедрения системы.

Основными составляющими процесса по каждому виду деятельности (образовательной, научной, информационной, административно-хозяйственной, социальной и финансовой) являются: маркетинг, проектирование, выполнение и контроль (рис. 3).

Целями вуза в области качества являются:

- достигать, поддерживать и стремиться к постоянному улучшению качества своей работы по всем направлениям деятельности с целью постоянного удовлетворения всех установленных и ожидаемых требований потребителей и других заинтересованных лиц;
- обеспечить уверенность ректорату и всем сотрудникам в том, что требования к качеству выполняются и поддерживаются;
- обеспечить уверенность потребителям и другим заинтересованным лицам в том, что требования к качеству всех работ достигаются или будут достигнуты в поставляемой продукции и предоставляемых услугах.

В качестве категории продукции вуза определены следующие:

- выпускники, кадры высшей квалификации;
- учебно-методическая литература;
- научно-техническая продукция;
- отдельные виды промышленной продукции;
- услуги (консультативные, информационные и др.).

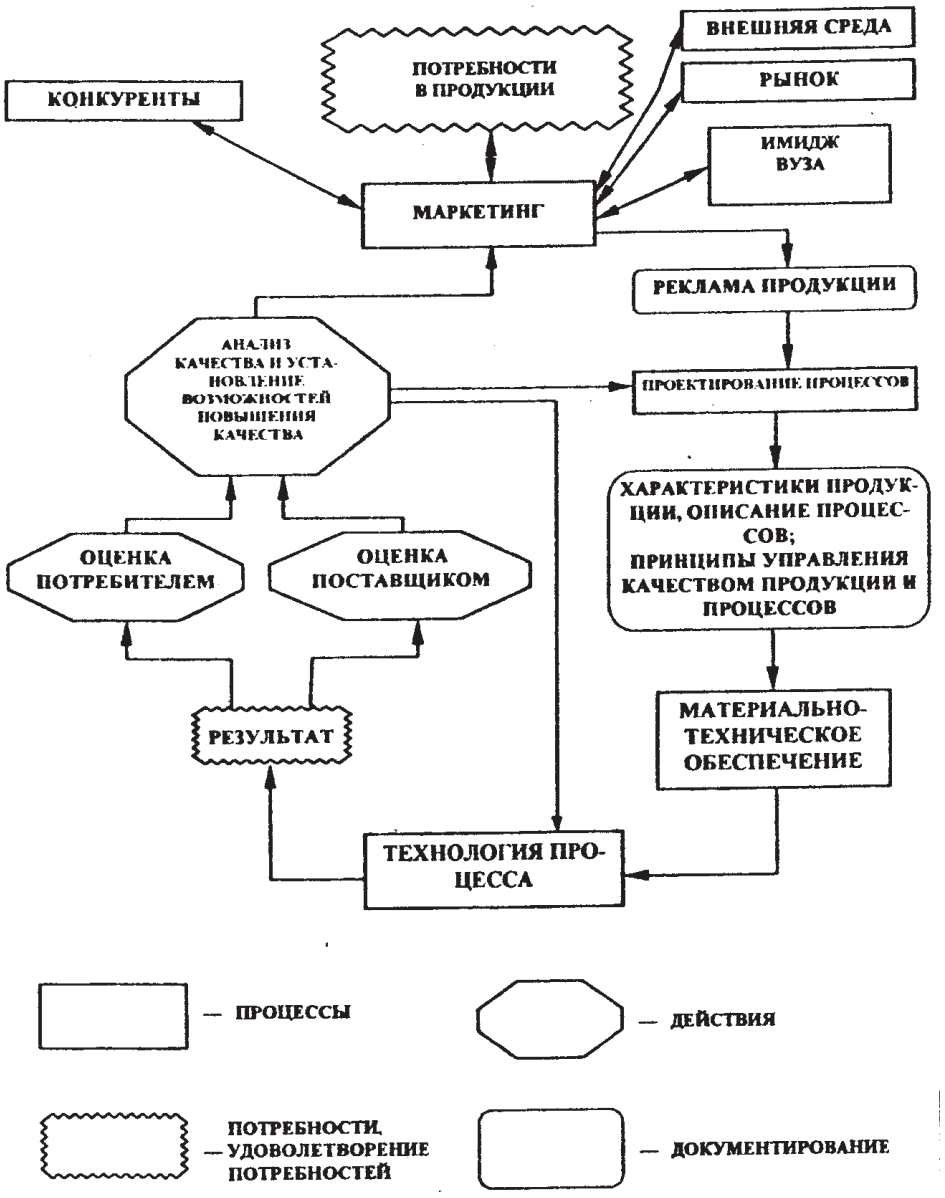



Рисунок 3 – Блок-схема управления качеством по различным видам деятельности

Вуз создает, улучшает и обеспечивает качество продукции с помощью сети процессов, что является концептуальной основой стандартов ИСО серии 9000. Стандарты рассматривают любую работу как процесс. Процесс сам по себе является преобразованием, которое добавляет ценность продукции. Каждый процесс включает трудовые, интеллектуальные и материальные ресурсы. Выходом может быть, например, учебный план, расписание занятий, курсовой и дипломный проект, диссертация, программный продукт, отчет по НИР, информация и т.п.

При анализе работы как процесса появляется возможность для выполнения оценки на входе, выходе и в различных точках процесса, и выполняются процедуры, которые необходимо документировать.

Так, например, рис. 4 иллюстрирует информационные потоки при взаимоотношениях поставщика с субпоставщиком и потребителем [3].

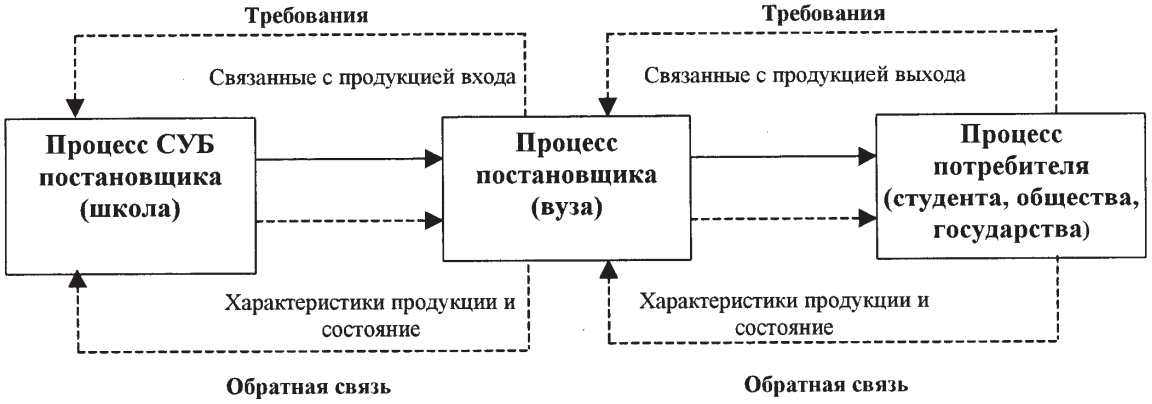



Рисунок 4 – Взаимосвязь процессов (с потоками продукции и информацией) в цели поставки

Система качества состоит из ряда элементов и функционирует посредством процессов, которые существуют как внутри вуза, так и вне его. Для эффективности системы качества эти процессы и соответствующие ответственность, полномочия, методики (процедуры) и ресурсы следует определить и развернуть на постоянной основе. Все элементы, требования и положения, относящиеся к системе качества, должны быть четко определены и документированы. Документирование процедуры системы качества составляют первичную документацию, использующую при общем планировании и управлении деятельностью, влияющей на качество. Они должны охватывать все применяемые элементы системы и описывать ответственность, полномочия и взаимодействие персонала, который руководит, выполняет или анализирует работу, влияющую на качество.

Документирование систем качества предусматривает создание двух групп документов: документации по качеству и документации по доказательству качества.

Документация по качеству содержит требования к качеству продукции; методы и ответственности персонала.

Документация по доказательству качества показывает степень выполнения требований, установленных документацией по качеству.

В связи с этим, если к документации по качеству предъявляется требование ее постоянной актуализации, то к документации по доказательству качества – архивирования.

Документация обеспечивает воспроизводимость процессов и принципов управления качеством, принятых в вузе; управлять можно только тем, что поддается проверке путем количественной или экспертной оценки установленных требований. Вся действующая в вузе документация должна быть систематично и точно описана в "Руководстве по качеству". В нем содержится изложение принципов управления, описание организационной структуры производственных процессов, влияющих на качество, ответственностей персонала, необходимые ссылки на все виды документации (нормативную, технологическую и директивную).

Помимо "Руководства по качеству" в вузе должна быть разработана и систематизирована следующая документация:

- стандарты системы качества вуза (документированные процедуры системы качества);
- методические рекомендации и инструкции, методики контроля, должностные инструкции, положения, альбомы форм бланков;
- Государственные образовательные стандарты;
- приказы, распоряжения и решения Ученого совета, ректора и научно-методического совета;
- законы РФ, постановления и распоряжения вышестоящих организаций.

Документация является основой для функционирования системы качества, причем она должна содержать специфику данного вуза. Купленное стандартное "Руководство по качеству" с уже установленными принципами вуза,

описанием элементов и процессов пользы не принесут.

"Руководство по качеству" является основным законом вуза по реализации управления качеством и путеводителем по системе качества.

Процедура (методика) и документация по процессу в рамках системы представляет собой второй уровень документации и составляет "каркас" системы качества. В процедурах и документации по процессам письменно фиксируются, каким образом протекают отдельные процедуры и процессы. Эта документация обеспечивает функционирование системы качества через установление взаимодействий и получение информации ввода-вывода (рис. 4). Рабочая документация по процесса представляет третий (самый нижний) уровень документации системы качества. Документация в виде рабочих и контрольных инструкций определяет деятельность и процессы на рабочих местах. Рабочая документация образует основу для разработки инструкций на оперативном уровне управления вузом.

Должностные инструкции регламентируют правовое положение сотрудников вуза и устанавливают функции, права, обязанности и ответственность должностных лиц.

И, наконец, "Положения о структурном подразделении" вуза регламентирует правовой статус структурного подразделения института и устанавливает его задачи, права, ответственность, взаимоотношения и связи, порядок организации работы.

Основной целью внедрения или оптимизации системы качества является улучшение организационных процессов, четкое определение ответственности за обеспечение бесперебойной повседневной работы и, как следствие, соответствующее снижение затрат и времени исполнения.

Реализация эффективной СУК ОП возможна только на основе интеграции этапов жизненного цикла образовательного процесса с использованием единой информационной среды [1] . Потребность в единой интегрированной информационной среде привело к созданию интегрированных информационных систем.

Решение задачи создания единой интегрированной информационной среды – это реализация концепции CALS-технологий (Continuos Acquisition and Life cycle Support), то есть использование технологий создания, поддержки и применения единого информационного пространства на всех этапах жизненного цикла продукции (в данном случае ОП), на что кстати, и ориентирована система инженерного образования.

Основные инструменты, технологии и информационная среда инженера и студента должна быть идентична. Поэтому возникает необходимость новых подходов в методике преподавания инженерных дисциплин с использованием информационных технологий (ИТ) в качестве инструмента для обучения, инженерной практики и науки.

Современный уровень развития информационных систем позволяет реализовать дидактическую систему инженерного образования, базирующуюся на использовании CAD/CAM/CAE/PDM-системы (проектирование, подготовка производства и конструирования, управление инженерными данными) в качестве единого средства обучения.

Предлагается практическое использование студентами единого инструмента – базовой CAD/CAM/CAE/PDM-системы при выполнении различных видов работ (домашних заданий, практических и лабораторных занятий, курсовых и выпускных работ и магистерских диссертаций и др.) по всем техническим дисциплинам учебного плана на каждом курсе обучения. В качестве базовых систем можно рекомендовать Компас, Лоцман, T-FLEX, СПРУТ.

Повышение эффективности внедрения ИТ обеспечивается формированием единого информационного пространства кафедрального и межкафедрального уровней, наполнение которого необходимо осуществлять совместными усилиями преподавателей и студентов при выполнении учебно-научных работ, выпускных и диссертационных работ. Таким образом, информационное пространство позволяет осуществлять передачу и хранение знаний [1].

Главная задача начального этапа формирования единого информационного пространства – обеспечить хранение и обмен информации через базу данных (БД) учебного процесса. Эффективная работа по формированию информационной модели специалиста возможна в том случае, если эта модель хранится в единой БД , и все взаимодействия по процессу осуществляются через эту базу (рис.5). Следовательно, важнейшей задачей формирования единого информационного пространства является разработка системы управления учебным процессом, которая должна повысить качество совместных работ преподавателей и различных кафедр, участвующих в учебном процессе. На каждом этапе подготовки специалиста осуществляется контроль и оценка качества учебного процесса путем сопоставления полученных результатов с информационной моделью специалиста. В результате чего производится корректировка учебного процесса.

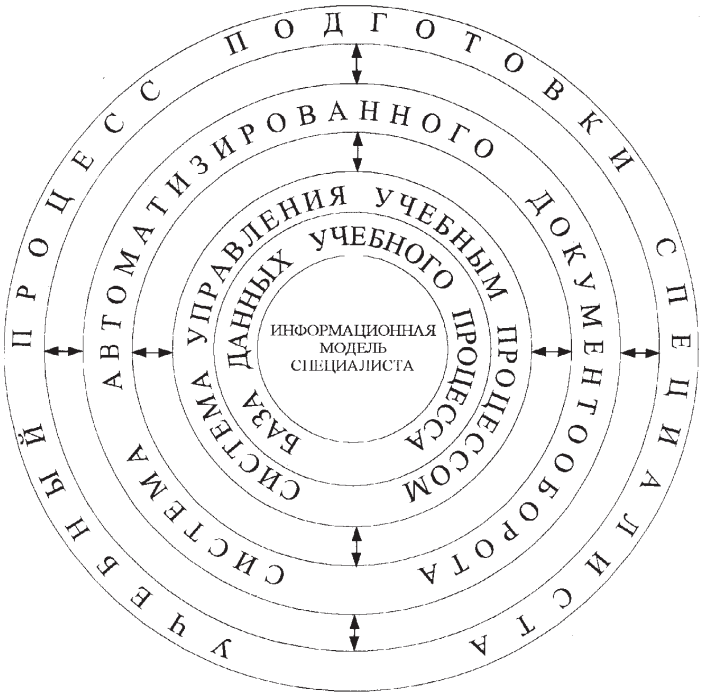



Рисунок 5 – Основные компоненты формирования единого информационного пространства при подготовке специалистов

**Список литературы**

1. *Полетаев В.А.* Управление качеством подготовки специалистов / ГУ Кузбасс. гос. техн. ун-т. - Кемерово, 2001. – 88 с.

2. *Субетто А.И.* Исследование проблемы качества сложной продукции: Дис. … д-ра экон. наук. – Л., 1987. – 722 с.

3. *Селезнева Н.А.* Автоматизация проектирования систем управления качеством высшего образования: Дис. … д-ра техн. наук. – Воронеж, 1992.

4. *Полетаев В.А.* Некоторые аспекты повышения эффективности процесса обучения // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2000. № 3. – С. 78-82.

5. *Полетаев, В. А.* Компьютерно-интегрированные производственные системы : учеб. пособие ; / В. А. Полетаев ; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2014. – 159 с.

## QUALITY MANAGEMENT TRAINING OF ENGINEERING

Poletaev V. A., D.Sc. (Engineering), Professor
Chicherin I. V., C.Sc. (Engineering), Associate Professor
(KuzSTU, Kemerovo)

**Abstract:** The issues related to the quality of engineering education and the design of university quality management system of educational process.

Implementation quality management system is based on the integration of life-cycle stages of the educational process and using a single information environment.

It is proposed to implement the didactic system of engineering education based on the use of CAD/CAM/CAE/PDM

**Keywords:** training, quality control system of the educational process, the life cycle of the educational process, engineering education.

**УДК 378.147:004.032.6]:514.18**

# ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОВЕРКИ ДОПУСКОВ ИГОЛЬЧАТЫХ ПОДШИПНИКОВ БЕЗ ВНУТРЕННЕГО КОЛЬЦА ДО ИХ МОНТАЖА

*В. В. БОЛКУНОВ,*
*А. Г. МИРОШКИН,*
*И. В. ЗЛОБИНА*
*(СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия)*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

**Аннотация:** Освещаются вопросы монтажа игольчатых подшипников при помощи специального калибра, определяющего угол конуса его рабочей части в зависимости от величины зазора между роликами, при их перекосе, и кольцом подшипника.

**Ключевые слова:** игольчатый подшипник, калибр, кольцо подшипника, ролики, проверка допусков

**Введение**

Для значительных радиальных нагрузок при малых размерах в различных машинах и механизмах широко используются игольчатые подшипники со штампованным наружном кольцом. Они применяются в трансмиссиях автомобилей, шкивах, шестеренчатых насосах, двигателях, копировальных автоматах и во многих других механизмах. Одним из основных достоинств таких подшипников является простая технология их изготовления и монтажа. Игольчатые подшипники часто используются без внутреннего кольца (рис. 1). Вал при этом превращается в дорожку качения с посадочной поверхностью, имеющей твердость, как минимум, между 64HRC и 58HRC.

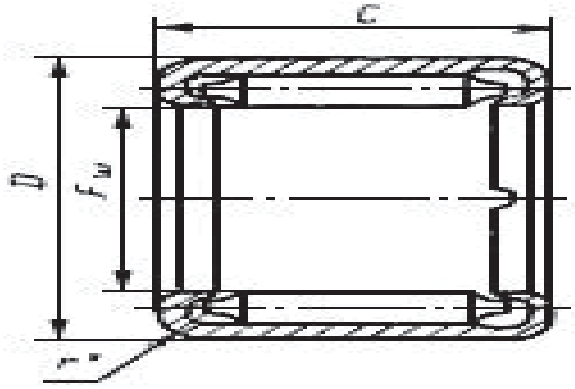



Рисунок 1 - Игольчатые роликовые подшипники с одним наружным штампованным кольцом со сквозным отверстием без сепаратора ( F - номинальный диаметр окружности, вписанной в комплект игольчатых роликов; D- номинальный диаметр наружной цилиндрической поверхности наружного кольца; C- номинальная ширина наружного кольца)

**Теория**

Проверка допусков игольчатых подшипников до их монтажа является сложной технологической операцией. Одним из основных нормируемых размеров подшипников без внутреннего кольца является диаметр окружности, вписанной в комплект игольчатых роликов. Для контроля по этому параметру применяют калибр-пробки [1]. Однако цилиндрическая форма рабочей поверхности калибра не соответствует поверхности контролируемого отверстия подшипника при перекосе роликов. Это приводит к возможной забраковке годных подшипников и деформации роликов при контроле.

В зарубежных подшипниковых фирмах применяют калибры, имеющие рабочую часть в виде конуса с нанесенными проходными и непроходными размерами в виде рисок. Однако, они не позволяют проводить качественный контроль диаметра окружности вписанной в комплект игольчатых роликов подшипника с одним наружным кольцом без сепаратора, так как выбор величины угла конуса не обосновывается и принимается произвольным [2].

В этом случае возможно: а) при завышении угла перекос иголок ведет к забраковке годных подшипников по непроходному размеру, а также с увеличением угла снижается точность контроля; б) при занижении угла забраковка годных подшипников по проходному размеру и деформация роликов при контроле.

В Научно-производственном предприятии нестандартных изделий машиностроения (г.Саратов) совместно со специалистами ПО "Третий государственный подшипниковый завод" предложен калибр, имеющий рабочую часть в виде конуса с нанесенными проходными

и непроходными рисками, угол конуса рабочей части калибра определяется по формуле:

$$tg\alpha = \frac{2\Delta}{L},$$

где Δ - максимально возможный зазор между роликами и кольцом подшипника при перекосе роликов; L - длина образующей профиля.

Отличительным признаком предложенного калибра является определение угла конуса рабочей части калибра в зависимости от величины зазора между роликами и кольцом подшипника при перекосе роликов. Установление зависимости угла конуса от величины зазора дает возможность максимально приблизить форму внутренней поверхности подшипника при перекосе роликов к поверхности калибра. На рис.2 изображен калибр для контроля игольчатых подшипников и контролируемый игольчатый подшипник

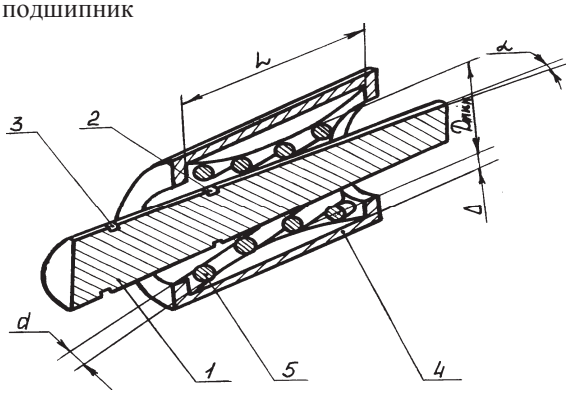



Рисунок 2. Калибр для контроля игольчатых подшипников

Калибр состоит из рабочей части 1, выполненной на конус, с нанесенными на ней проходной 2 и непроходной 3 рисками. Калибр вставляется свободно под действием собственного веса в контролируемое отверстие подшипника 4, в котором ролики 5 расположены с перекосом. При этом между роликами 5 и кольцом 4 образуется зазор Δ - величина которого определяется по формуле:

$$\Delta = \frac{(D_{мин}-d)\left(1-\cos\left[360^0\left(1-\frac{2arctg\left(\frac{d}{2(D_{мин}-d)}\right)}{360^0}N\right)\right]\right)}{2},$$

где $D_{мин}$ - минимальный диаметр отверстия кольца подшипника; $d$ - номинальный диаметр роликов; $N$ - количество роликов в подшипнике.

Контроль производят по расположению проходной 2 и непроходной 3 рисок относительно торца подшипника. При положении проходной риски 2 выше торца подшипник бракуется (размер занижен). Если риска 2 вошла в кольцо, а риска 3 выступает за торец, подшипник годный. Если риска 3 ниже торца, подшипник бракуется (размер внутреннего диаметра завышен).

**Вывод**

Исключение влияния перекоса роликов при контроле внутреннего диаметра игольчатого бессепараторного подшипника позволяет существенно повысить достоверность проверки допусков по нормируемому параметру.

## Список литературы

1. ГОСТ 24851-81. Калибры гладкие для цилиндрических отверстий и валов. Виды.

2. Инструментальное производство США, ФРГ, Японии и Англии. М.: НИИМАШ, 2009. - 175 с.

## NCREASE OF RELIABILITY OF VERIFICATION OF ADMISSIONS OF NEEDLE BEARINGS WITHOUT INTERNAL RING BEFORE THEIR INSTALLATION

**Bolkunov V. V.,**
**Miroshkin A. G.,**
**Zlobina I. V.**

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
77 Politechnicheskaya street, Saratov, Russia, 410054
miroshkin_artem@mail.ru, irinka_7_@mail.ru

**Abstract:** Questions of installation of needle bearings by means of the special caliber defining a corner of a cone of its working part depending on gap size between rollers at their distortion are taken up, and a bearing ring.

**Keywords***:* needle bearing, caliber, bearing ring, rollers, verification of admissions

**УДК 620.193**

# ПРОБЛЕМА КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ В АВТОКЛАВАХ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО СИНТЕЗА КРИСТАЛЛОВ КВАРЦА

*Д.Ю.ГАБАЙДУЛИН, аспирант, e-mail: d.gabaydulin@gmail.com*
*М.В.ГРЕЧНЕВА, к.т.н, профессор, e-mail: mgrech@irk.ru*
*(ИрНИТУ, г.Иркутск, ул.Лермонтова 83, Россия.)*

Габайдулин Д.Ю., Гречнева М.В. - 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет

**Аннотация:** Проанализированы условия выращивания кристаллов кварца высокой чистоты в автоклавах гидротермального синтеза. Рассмотрена проблема коррозионного растрескивания под напряжением стенок автоклавов, обостряющаяся из-за применения более жёстких режимов синтеза для сокращения цикла роста кристаллов и повышения их чистоты. Приведён обзор путей решения проблемы.

**Ключевые слова:** коррозионное растрескивание под напряжением; автоклавы гидротермального синтеза; исследование причин разрушения.

Кварцевые кристаллы находят широкое применение в электронной, радиоэлектронной промышленности, медицинском оборудовании и оптике. К кристаллам предъявляются высокие требования по чистоте. Они выращиваются искусственно, поскольку природные образцы не имеют достаточной чистоты своей структуры. Требуемая чистота достигается при гидротермальном выращивании кристаллов в условиях высокого давления, температуры и определенной концентрации химически активного вещества, выступающего в роли носителя частиц, формирующих кристалл. Для выращивания кристаллов кварца используются автоклавы гидротермального синтеза (рис. 1), устанавливаемые вертикально. Это приводит к растворению шихты, находящейся в нижней части автоклава, создавая насыщенный раствор. Насыщенный раствор конвекционными потоками поднимается в верхнюю часть автоклава, где температура ниже, чем в нижней части. Это вызывает перенасыщение раствора, и начинается процесс кристаллизации [1]. Для контроля этого процесса в верхней части находятся пластины с затравками (частицы кристалла), на которых фокусируется процесс кристаллообразования.

Рисунок1 – Автоклав для гидротермального синтеза

Типичный цикл роста составляет около 30 дней (при давлении 100 МПа, температуре 350ºС и концентрации NaOH 3% + $Na_2CO_3$ 7%) и позволяет вырастить крупный монокристалл весом до 1 кг. Как показали эксперименты [2], 3%-ая концентрация щелочи в рабочем растворе не опасна для металла автоклавов. В процессе технологического цикла образуется градиент концентрации NaOH по объёму автоклава из-за фазового и концентрационного расслоения технологической среды. Это приводит к значительному превышению номинальной концентрации NaOH в нижней части автоклавов [3].

В ОАО «ИркутскНИИхиммаш» обследовалась работоспособность автоклавов для Всероссийского научно-исследовательского института синтеза минерального сырья (ВНИИСИМС). Разработаны рекомендации по модернизации автоклавов этого типа с целью увеличения срока службы и повышения надежности. Сочетание высоких растягивающих напряжений с повышенной концентрацией NaOH в рабочем растворе способствовало интенсивному повреждению металла корпуса автоклава в зоне нижнего фланца [4]. Предложенный вариант решения проблемы не нашел практического применения из-за сложности реализации.

В дальнейшем были проведены исследования по применению стали 38ХН3МФА в качестве основного материала для сосудов гидротермального синтеза при более жестких условиях работы [5]. Эта сталь показала работоспособность при требуемых режимах эксплуатации Т = 400°С, давлении 120 МПа и концентрации щелочи 5–10%.

Совершенствование технологий требует возрастающих количеств высококачественных кристаллов. ОАО «ИркутскНИИхиммаш» на протяжении 15 лет периодически получает запросы о выборе материалов для проектирования новых

сосудов, работающих при повышенных концентрациях щелочи, например, с режимом работы при температуре 420°С, давлении 140 МПа и концентрации щелочи 10%. Данные, требуемые для проектирования, в литературе отсутствуют. Задачей настоящего исследования является выбор сталей для автоклавов, стойких к коррозионному растрескиванию в условиях гидротермального синтеза кристаллов кварца.

Коррозионное растрескивание под напряжением (Stress Corrosion Cracking – SCC) отличается от других видов коррозии. Оно происходит при комбинированном воздействии коррозионной среды и механических напряжений в металле. При эксплуатации развитие коррозионного растрескивания под напряжением, подобно усталостному разрушению, протекает очень медленно, и его трудно выявить до наступления внезапного разрушения. Суть SCC состоит в реакции щелочи с незащищенными атомами железа ($Fe$), расположенными между границами кристаллов, с образованием окислов, увеличивающих объем и развивающих дополнительные большое напряжение в металле. $NaOH$ так же растворяет загрязнения (примеси) по границам зерен, ослабляя и разрыхляя его структуру, что способствует возникновению трещин под действием механических напряжений. Водород, образовавшийся в результате реакции $3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_2 + 4H_2$, усиливает трещинообразование, образуя различные газообразные продукты при реакции с углеродом, сульфидами и другими примесями в стали. В результате развиваются дополнительные разрывные усилия, которые способствуют разрыхлению структуры, углублению, расщеплению и разветвлению трещин. Дальнейшее развитие трещин облегчается появлением местной концентрации напряжений. Скорость распространения коррозионной трещины со временем возрастает до катастрофических значений.

SCC сталей происходит в концентрированных растворах щелочей при повышенных температурах [6] и имеет следующие особенности: трещины сильно разветвлены, их ответвления имеют межкристаллитный характер; в зоне образования трещин отсутствует деформация металла (хрупкое разрушение); механические свойства разрушенного металла почти не меняются; излом темный, структура мелкозернистая [7]. На SCC существенно влияют химический состав стали, ее структура, прочностные характеристики, величина напряжений в металле, концентрация и чистота щелочи, температура [8].

Среди углеродистых сталей наименьшей склонностью к SCC обладают мартеновские спокойные стали с 0,2% углерода и феррито-перлитной структурой [9]. Из низколегированных сталей наименее восприимчива сталь, содержащая менее 0,1% углерода, 2—4% хрома и не менее 0,8% алюминия [10].

Стали с мелкозернистой структурой менее подвержены щелочному растрескиванию, чем крупнозернистые. Следовательно, всякая обработка металла, способствующая росту зерна, одновременно понижает стойкость стали к этому виду разрушения [9]. Из различных структур стали наибольшую склонность к SCC проявляет мартенситная. Влияние качества и структуры металла, размера зерна и т. д. на склонность стали к SCC обусловлено двумя факторами — величиной остаточных растягивающих напряжений и количеством дефектов внутри металла. Чем больше остаточные напряжения в металле, тем (при прочих равных условиях) выше его склонность к коррозионному растрескиванию. Аналогично влияние внутренних дефектов в металлах, представляющих собой потенциальные концентраторы напряжений.

Растрескиванию в щелочных растворах подвержены высоколегированные хромистые и хромоникелевые нержавеющие стали, однако при значительно более высоких температурах [9]. На рис. 2 показаны зоны температур и концентраций щелочи, в которых возможно коррозионное растрескивание углеродистых и нержавеющих аустенитных сталей. Увеличение содержания никеля в аустенитных сталях понижает склонность к щелочному растрескиванию. В растворе с концентрацией 20% $NaOH$ при 200 и 350°$C$ сталь Х23Н27М2Т не подвергалась коррозионному растрескиванию. Это отмечалось также в условиях выпаривания раствора от 25 до 55% $NaOH$.

Ферритные хромистые нержавеющие стали более стойки к щелочному растрескиванию, чем аустенитные стали типа 18-8 [9]. Вместе с тем, отмечалось растрескивание сталей Х13 и ХI7 в растворе $NaOH$ с концентрацией 25-26% при 200°С. Однако сталь с более высоким содержанием хрома (Х28) при испытаниях в этом же растворе при 200 и 300°С не подвергалась коррозионному растрескиванию.

Испытания на склонность к SCC некоторых основных сталей нефтяного аппаратов нефтепереработки (ВЛСт.3сп, ВМСт.3сп, 20К, 16ГС, 08Х13 и 12Х18Н10Т в состоянии поставки) проводили в лабораторных условиях (20—50% растворы $NaOH$ при температурах до точек кипения) и нефтезаводских - концентрация $NaOH$ 10—20%, температура 85°$C$, давление 2,0 $МПа$ с выдержкой до 1 года. Напряжения в образцах создавали методом постоянной деформации путем дугового изгиба в специальных скобах. В случае напряжений ниже условного предела текучести металла при изгибе $\sigma_{0,2}$ все испытываемые стали не подвергались растрескиванию.

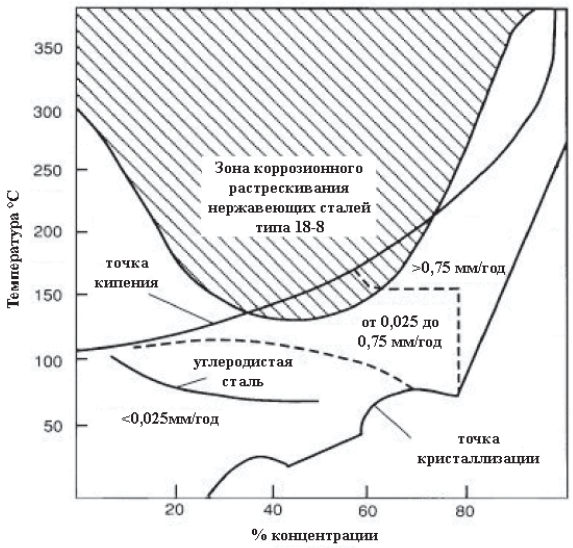



Рисунок 2 - Зависимость коррозионного растрескивания углеродистых и нержавеющих сталей от температуры и концентрации *NaOH*

При напряжениях выше $\sigma_{0,2}$ (т.е. соответствующих упруго-пластической области деформаций металла) растрескивались все углеродистые и низколегированные стали. Высоколегированные стали 08Х13 и 12Х18Н10Т при напряжениях больше $\sigma_{0,2}$ не разрушались.

Использованные в рассмотренных испытаниях относительно высокие деформации металла, сотвечающие напряжениям выше $\sigma_{0,2}$, встречаются на практике в наиболее напряженных местах нефтеаппаратуры (например, в сварных соединениях). Поэтому, результаты этих испытаний можно использовать для практических рекомендаций.

Металлографическое исследование образцов с трещинами показало выраженный межкристаллитный характер разрушения. Лабораторными испытаниями установлено усиление SCC углеродистых и низколегированных сталей (ВКСт3сп, ВМСт3сп, 20К, 16ГС) при повышении твердости образцов, а также при наличии в них сварного шва или надреза.

Во ВНИИНефтемаше испытывались образцы стали 12Х1МФ с аустенитными сварными швами (И.С.Шпарбер) напряженные дуговым изгибом. Такие образцы подвергались растрескиванию с образованием трещин точно по границам сварного шва после выдержки в течение 200 ч в 35% растворе *NaOH* при 90—120°*C*. Испытания показали недопустимость сварки низколегированных сталей аустенитными электродами для нефтеперерабатывающего оборудования, эксплуатируемого в условиях возможности коррозионного щелочного растрескивания.

Никель и никелевые сплавы имеют низкую скорость коррозии в щелочных средах *NaOH* и мало загрязняют продукт ионами металла. При увеличении содержания никеля в никелевых сплавах возрастает их сопротивляемость коррозии и SCC в растворах *NaOH*. Никель имеет самую низкую скорость коррозии в безводном расплавленном гидроксиде натрия, при температурах до 540°C имеет абсолютный иммунитет к коррозии и SCC[10].

Чистый никель, например Nickel 200 (*Ni*=99%; *C*=0,15%; *Cu*= до 0,4%; *Fe*= до 0,4%) в основном используется в производстве *NaOH*. При концентрировании *NaOH* в испарительных процессах или в ходе других химических процессов коррозионная активность *NaOH* сильно увеличивается. При температурах выше 315°*C*, чистый никель заменяется на Nickel 201, в котором понижено содержание углерода. Этот материал был специально разработан для того, чтобы избежать межкристаллитную коррозию, которая может развиваться в Nickel 200 (0,15% углерода максимум).

При производстве соли, в обработке соляных растворов в гидрооксиде натрия, Monel 400 хорошо зарекомендовал себя в работе теплообменников, вакуумных аппаратов, подогревателей, сушилок и трубопроводов. Inconel 600 и Inconel 800 широко используются в атомных парогенераторах при температурах около 300ºС. В большинстве ситуаций высокохромистый сплав Inconel 690 более стоек к коррозионному растрескиванию под напряжением.

**Выводы**

Причинами появления и развития коррозионного растрескивания в автоклавах являются щелочная среда, необходимая для роста кристаллов, и высокие механические напряжения, возникающие в результате совместного воздействия давления и температуры. Конструктивное снижение механических напряжений сложно в реализации. Единственным реальным путем снижения растрескивания в автоклавах является выбор более коррозионностойкого материала для изготовления оборудования.

Для выбора оптимального материала необходимо проведение исследований коррозионной стойкости в условиях, близких к реальным эксплуатационным. Судя по литературным данным, существуют марки сталей и сплавов, способные обеспечить достаточную стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Для испытаний на стойкость к коррозионному растрескиванию разработан специальный тип трубчатого образца, воспроизводящий условия, приближенные к эксплуатационным. Проведены первые испытания сталей различных марок, получены первые результаты.

## Список литературы

1. Современная кристаллография, том 3, образование кристаллов: А. А. Чернов, Е. И. Гиваргизов, Х. С. Багдасаров и др.; под ред. Б.К.Вайнштейн. - М.: Наука, 1980. - 401 с.
2. *Брэгг, У. Л.* Кристаллическая структура минералов / У. Л. Брэгг, Г. Ф. Кларинбум. - М.: Мир, 1967. - 390 с.
3. *Корчагин, А. П.* Анализ температурных полей и термоупругих напряжений элементов сосудов / А. П. Корчагин. - И.: ОАО «ИркутскНИИхиммаш», 1980.
4. *Корчагин, А. П.* Оценка напряженного состояния основных элементов нижней части сосуда / А. П. Корчагин. - И.: ОАО "ИркутскНИИхиммаш", 1980.
5. *Корчагин, А. П.* Исследование работоспособности и разработка рекомендаций по модернизации автоклавов типа СБТ ёмкостью 1500 л из стали 48ТС (38ХН3МФА) / А. П. Корчагин. - И.: ОАО "ИркутскНИИхиммаш", 1980. - 43 с.
6. *Сухонин, А. М.* Коррозия и защита химической аппаратуры: справочное руководство / А. М. Сухотин, т.8,-М.: Химия,1972. - 320 с.
7. *Акользин, П. А.* Межкристаллитная коррозия, коррозионное растрескивание и коррозионная усталость металлов / П. А. Акользин // Коррозия металлов и методы борьбы с ней: сб. - М.: Оборонгиз, 1955. - С. 71.
8. *Габайдулин, Д.Ю* Коррозионное растрескивание металлов в автоклавах гидротермального синтеза кристаллов кварца / Д. Ю. Габайдулин, М. В. Гречнева // Вестник ИрГТУ - И.: НИ ИрГТУ, 2014. - №6 (89). - С.41-45.
9. *Шварц, Г. Л.* Коррозия химической аппаратуры / Г. Л. Шварц, М. М. Кристаль. - М.: Машгиз, 1958.
10. *Bruce, D. C.* Handbook of corrosion data 2nd ed. / Bruce D. C, David S. A. - ASM international, 1995.

## PROBLEM OF STRESS CORROSION CRACKING IN GYDRO-TERMAL VESSELS FOR THE SYNTHESIS OF QUARTZ CRYSTALS

**D.Y.Gabaydulin**, postgraduate student, e-mail: d.gabaydulin@gmail.com
**M.V.Grechneva**, Ph.D., professor, e-mail: mgrech@irk.ru
Irkutsk national research technical university, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, RF.

**Abstract:** Analyzed the conditions of crystal growth of high purity quartz hydrothermal synthesis in autoclaves. The problem of stress corrosion cracking on the voltage of the walls of autoclaves, exacerbated by more stringent modes of synthesis to reduce the cycle of crystal growth and increase their purity. An overview of solutions to the problem.

**Key words:** stress corrosion cracking ; autoclaves for hydrothermal synthesis; research into the causes of destruction;

**УДК 621.9 06-192:620.1**

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА НА ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ

*В.П. ГОРБУНОВ – канд. техн. наук, доцент,*
*В.Ф. ГРИГОРЬЕВ - канд. техн. наук, доцент.*
*(БрГТУ, г. Брест, Беларусь)*

Горбунов В.П. - 224017, г. Брест, ул. Московская, 267,
Брестский государственный технический университет,
e-mail: mashin@bstu.by

**Аннотация:** По результатам исследования предложена методика компьютерного моделирования термоупругих процессов несущей системы станка и прогнозирования изменения его геометрической точности по критерию смещения оси шпинделя во времени. На примере многоцелевого станка модели МС 12-250 апробируется методика создания тепловой модели вертикальной стойки в среде конечно-элементного модуля Cosmos Works. На основании зависимости смещения оси шпинделя от температуры в передней опоре можно прогнозировать изменение начальной точности станка с последующей компенсацией погрешности устройством ЧПУ, а также определять пути увеличения точности при проектировании станков.

**Ключевые слова:** Станки, термоупругие смещения, прогнозирование точности, Cosmos Works.

**1.Введение**. Для металлорежущих станков потеря работоспособного состояния в первую очередь связана с выходом основных точностных параметров за допустимые пределы. Проблема особенно актуальна для многоцелевых станков (МС) с числовым программным управлением (ЧПУ), являющихся сложным и дорогостоящим оборудованием, эксплуатируемым зачастую в три смены.

Главным фактором, приводящим к снижению точности высокоточных МС станков, являются тепловые деформации его базовых деталей, составляющих несущую систему. Детали несущей системы станка подвержены наибольшим тепловым деформациям, так как имеют значительные размеры и теплопроводящие поверхности. Из-за повышенной энергоемкости МС с ЧПУ через 3…4 часа после начала работы тепловые деформации могут достигать значительных величин (до 0,1 мм и выше) [1].

Тепловые деформации станка приводят к отклонению взаимного положения инструмента и заготовки, в результате чего увеличиваются погрешности формы и взаимного расположения обрабатываемых поверхностей, а также снижается точность размеров этих поверхностей. Доля тепловых погрешностей прецизионных станков может составлять 40…70% общей погрешности обработки [2].

При длительной эксплуатации станка возникает необходимость компенсации тепловых деформаций для снижения их влияния на точность обработки. Существуют различные методы компенсации и минимизации термоупругих смещений элементов МС, в том числе с помощью функции коррекции в управляющей программе ЧПУ. Для принятия поправок необходимо знать величину тепловых смещений для каждого момента времени, так как она является функцией температуры $\Delta=f(\theta)$, которая в свою очередь есть пространственно-временная функция $\theta=f(x,y,z,t)$, представляющая собой температурное поле [3].

Чтобы выделить зависимость выходного параметра точности от температуры несущих элементов и с достаточной степенью точности прогнозировать величину теплового смещения оси шпинделя необходимо проводить эксперимент.

Недостаток экспериментального исследования в необходимости воспроизводить продолжительный процесс функционирования оборудования, так как тепловые процессы носят нестационарный характер, и до наступления теплового равновесия проходит порядка 4…6 часов. Результаты эксперимента применимы для прогнозирования технологического состояния лишь исследуемого станка и при смене объекта трудоемкий эксперимент следует повторять.

Моделирования теплофизических процессов, происходящих в технологическом оборудовании, с помощью ЭВМ и специализированных программных средств сокращает трудоемкость решения аналогичных задач при смене объекта исследования, так как однажды созданную тепловую модель можно быстро адаптировать к новому объекту.

Целью работы является разработка и апробация методики компьютерного моделирования термоупругих процессов при оценке тепловых деформаций несущей системы станка и прогнозирования изменения его геометрической точ-

ности по критерию смещения оси шпинделя во времени.

**2.Методика исследования**. Исследование выполнялось применительно к многоцелевому станку с горизонтальным шпинделем в следующем порядке.

1. По доступной технической документации и чертежам производился анализ компоновки и конструкции станка, элементов несущей системы, характера их сочленения. Выявлялись базовые детали с наиболее протяженными теплопроводящими поверхностями.

2. Создавалась трехмерная твердотельная полноразмерная модель вертикальной стойки станка, несущей шпиндельный узел, в графической среде Solid Works. При построении модели учитывались конструктивные элементы, влияющие на жесткость: отверстия в стенках, внутренние ребра жесткости, бобышки и выступы для крепления узлов станка.

3. Выполнялся анализ теплового режима с учетом факторов теплового режима эксплуатации станка: количества, мощности, расположения внутренних и внешних источников тепловыделения; возможных направлений протекания элементарных процессов (теплопроводность, конвекция, тепловое излучение); температуры окружающей среды; интенсивности тепловых процессов при различных режимах работы; наличия конструктивных и технологических стоков теплоты (система охлаждения, вентиляционные отверстия и др.). Производились измерения температуры отдельных наружных и внутренних поверхностей в области шпиндельного узла при работе.

4. Проводилось моделирование термоупругих процессов стойки в среде конечно-элементного модуля Cosmos Works. Создавалась сетка дискретизации. К твердотельной модели прикладывались граничные условия: теплофизические свойства материала стойки; температуры поверхностей, рядом с которыми расположены источники тепловыделения; конвективный теплообмен с окружающей средой и временной интервал до наступления теплового равновесия. Определялось распределение температуры по наружным и внутренним поверхностям рассматриваемого базового элемента.

5. Экспериментально проверялась приемлемость моделирования или адекватность тепловой модели. Параметры модели подвергались корректировке для достижения сходимости с экспериментальными результатами.

**3.Результаты исследования и обсуждение.** Для многоцелевых станков наиболее распространена компоновка с вертикальной стойкой, несущей шпиндельный узел. Такую компоновку имеет станок мод. МС 12-250. Наибольшие геометрические размеры в станке имеет вертикальная стойка коробчатой формы.

На основании технической документации по геометрическим размерам создана трехмерная твердотельная полноразмерная модель стойки в графической среде Solid Works с присвоением теплофизических свойств материала (чугун СЧ20). При построении учтены все конструктивные элементы, влияющие на тепловую упругость: внутренняя полость, ниши для размещения исполнительных механизмов и узлов, направляющие, технологические отверстия. Определение полей осуществляется в среде конечно-элементного модуля Cosmos Works.

На основании анализа конструкции станка и природы тепловых процессов в стойке рассчитаны коэффициенты теплоотдачи и создана тепловая модель. Проведенный термический анализ включал в себя имитационный нагрев стойки до термостабилизации станка при работе. Принят переменный режим работы станка на примере обработки детали «корпус». На рисунке 1 приведен график изменения теплового потока в передней опоре шпинделя. Для каждого источника тепловыделения построены аналогичные графики, которые являются граничными условиями при создании тепловой модели стойки и определении ее теплового поля.

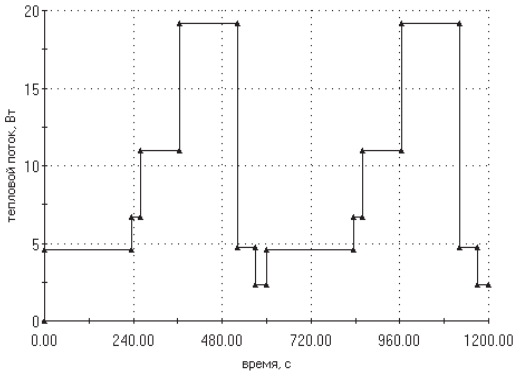



Рисунок 1 – Тепловой поток в стойку в передней опоре шпинделя при выполнении одной операции

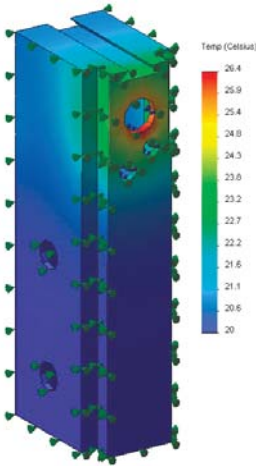



Рисунок 2– Тепловое поле стойки при $\tau=1$ час

На рисунке 2 показано тепловое поле стойки в начальный период времени и сформировавшееся через 1 час после включения шпинделя. По тепловой модели определены деформации и смещения поверхностей и точек стойки.

Полученные градиенты распределения температур показывают, что нагрев передней стенки стойки происходит более интенсивно, самым мощным источником тепловыделения является передняя опора шпинделя. Через час поле начала работы температура поверхности стойки у передней опоры достигает *26,4*ºС, при наступлении теплового баланса *29,9*ºС. По результатам температурного анализа построены кривые изменения температур.

На рисунке 3 приведены эпюры смещений стойки, наложенные на деформированную модель. Деформации стойки показаны утрированно, для того чтобы можно было увидеть область наибольших смещений.

Величина линейного смещения опор шпинделя вдоль оси Y изменяется по экспоненциальному закону (рис. 4). Следует учитывать, что полное смещение при определенном вылете шпинделя складывается из линейного смещения при тепловом расширении передней стенки и смещения при повороте оси шпинделя в вертикальной плоскости из-за неодинаковых тепловых деформаций передней и задней стенки. Стабилизации тепловых деформаций на исследуемом промежутке времени не происходит, можно наблюдать лишь снижение интенсивности. Максимальная величина смещения оси шпинделя $\Delta Y$=28,2 мкм при температуре в передней опоре $\theta$=25,6ºС. В связи с появляющимся угловым смещением оси шпинделя $\Delta\varphi$ величина смещения может меняться в зависимости от вылета инструмента. В пределах рассматриваемого интервала времени доля углового смещения оси шпинделя достигает 3 мкм при вылете инструмента $\Delta z$=150 мм.

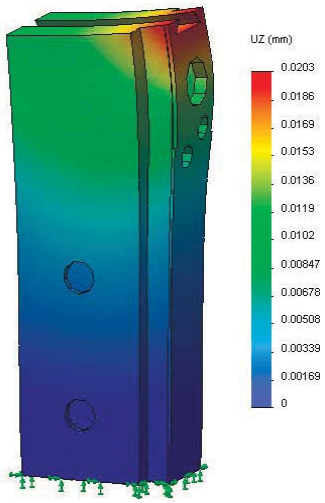



Рисунок 3– Смещения (деформации) стойки вдоль оси *Y* при $\tau$=*1* ч

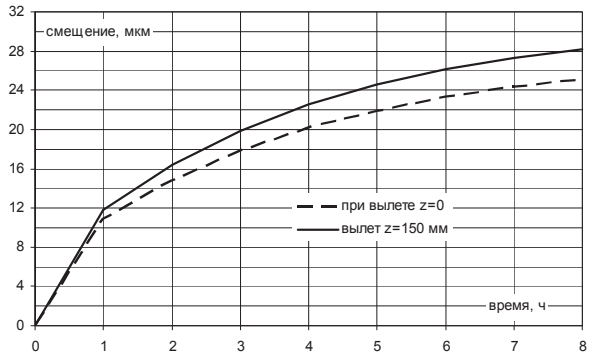



Рисунок 4 – Кривая смещения во времени оси шпинделя вдоль оси Y при различных вылетах

Контрольными измерениями с построением кривой смещения оси шпинделя, было установлено, что тепловые деформации стабилизируются через 3 ч.

После коррекции тепловой модели лишь по одному параметру – времени переходного процесса, кривая смещения практически приблизилась к экспериментальной (рис. 5).

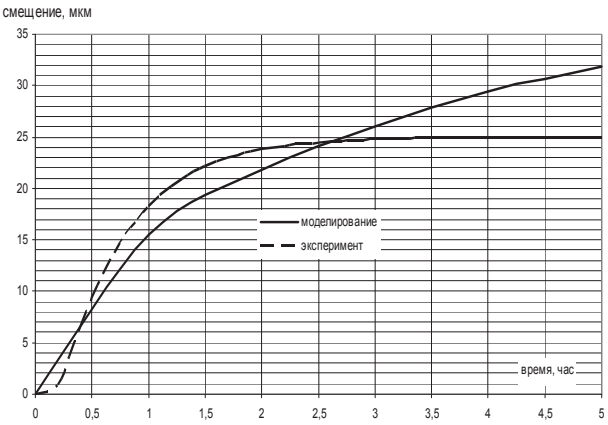



Рисунок 5 – Кривая изменения смещения оси шпинделя после коррекции тепловой модели

**Выводы** 1. Предложена методика построения термоупругой модели. Тепловые потоки можно задавать с полной детализацией при каждой смене режимов работы станка в пределах одной операции, либо задавать их усредненное значение за период одного цикла обработки.

2. Определено тепловое поле стойки станка, и характер изменения во времени смещения оси шпинделя с учетом изменяющихся режимов обработки, как в течение одной операции технологического процесса, так и за межналадочный период. Установлена зависимость смещения от температуры в передней опоре шпинделя. Наибольшее смещение оси шпинделя при вылете $\Delta z$=150 мм составило $\Delta Y$=28,2 мкм при температуре в передней опоре $\theta$=25,6ºС, при этом угловое смещения оси составило $\Delta\varphi$=4.2".

3. На основании зависимости смешения оси шпинделя от температуры в передней опоре можно прогнозировать изменение начальной точности станка с последующей компенсацией погрешности устройством ЧПУ, а также определять пути увеличения точности при проектировании станков за счет изменения расположения источников тепловыделения, мощности тепловых потоков и конструкции элементов.

## Список литературы

1. *Горбунов В.П., Омесь Д.В.* Анализ тепловых деформаций стойки многоцелевого станка с числовым программным управлением // Вестник брестского государственного технического университета. – Брест, 2010. - №4(64):Машиностроение. – с.36-39.

2. *Горбунов В.П., Григорьев В.Ф., Рудиюк А.Н.* Диагностирование тепловых деформаций многоцелевого станка с ЧПУ. // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2008. - №4(52): Машиностроение. – С. 34-37.

3. *Соколов Ю.Н.* Термические расчеты в станкостроении. – М.: Машиностроение, 1968. – 77 с.

## EVALUATION OF THE EFFECT OF MACHINING CENTERS THERMAL DEFORMATION ON ACCURACY FIGURES

**Gorbunov V. P.,** C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mashin@bstu.by
**Grigoriev V.F.,** C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: yandex.by
Brest State Technical University, 267, street Moskovskaya, Brest, 224017, Belarus

**Abstract:** Based on the research findings was offered the method of computer modeling of machine-tool carrying system thermoelastic processes and forecasting changes in its geometric accuracy based on spindle axis offset in time. The machining center model MC 12-250 was used to test the method of creating thermal model of upright in the environment of the finite element module Cosmos Works. Here are reported results of modeling of the thermal field, upright deformation and machine-tool spindle axis offset. Based on the relationship between spindle axis offset and the temperature of the front support, the change of initial machine-tool precision and the following error compensation by CNC control units can be predicted. It is possible to find ways to raise accuracy in the design of machine-tools by changing the location of heat sources, heat flows power and member construction.

**Keywords:** machine-tools, thermoelastic offset, precision forecasting, Cosmos Works.

**УДК 621.9:534.6**

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

*Н. И. МОЗГОВОЙ, канд. техн. наук, доцент,*
*Я. Г. МОЗГОВАЯ, канд. техн. наук, доцент,*
*Е. А. ПАШКОВА, студентка,*
*(АлтГТУ, г.Барнаул, Россия)*

656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
nick_3@mail.ru

**Аннотация:** Рассматривается возможность применение эхо-метода для контроля современных пластичных материалов. Проведенные исследования пластичных материалов позволили выявить внутренние дефекты, неоднородность и наличие посторонних включений без разрушения изделия.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, эхо-метод, ультразвук, пластичные материалы, качество поверхности, внутренние дефекты, обработка материалов.

**Введение**

Среди новых конструкционных материалов особое место принадлежит пластичным массам и синтетическим смолам. Эти материалы широко используются при изготовлении широкой номенклатуры деталей машин, заменяя цветные металлы и материалы с особыми физико-механическими свойствами.

Для большинства пластмасс характерны следующие физико-механические свойства, которые позволяют им конкурировать с металлами [1-3]:

-низкая плотность полимерных материалов (1,1—1,8 г/см$^3$);

-пластмассы не подвержены коррозии;

-высокие электроизоляционные свойства, позволяющие применять пластмассы в качестве диэлектриков;

- высокая удельная и абсолютная механическая прочность;

-наличие неограниченных ресурсов дешевого сырья;

-высокая технологичность (трудоемкость изготовления деталей из пластмасс незначительна);

-низкий коэффициентом трения (текстолит, древеснослоистые пластики, капролон заменяют бронзу и баббит в подшипниковых узлах машин);

-высокая износостойкость (фенопласты с асбестовым наполнителем, пресскомпозиции на основе каучуков заменяют чугун и дорогие сорта дерева);

-прозрачность (органическое стекло, полистирол применяют в оптической промышленности и машиностроении для изготовления прозрачных деталей).

Одновременно, пластмассы обладают следующими **недостатками:**

-низкой теплостойкостью (от - 60 до +200 °С);

-низкой теплопроводностью (500 - 600 раз ниже теплопроводности металлов, что ограничивает их применение в узлах и деталях машин, где необходим быстрый отвод больших количеств теплоты);

-выраженным свойством ползучести, особенно ярко заметным у термопластов;

-малой жесткостью (модуль упругости самых жестких пластмасс (стеклопластиков) на порядок ниже, чем у металлов);

-старением (ухудшаются под действием температуры, влажности, света, воды).

В пластичных материалах могут возникать следующие дефекты [4-6]:

- раковины и пузыри, которые образуются в результате неплотной набивки формы при прессовке и литье, при выделении газов в результате химической реакции;

- трещины, образующиеся под действием внешних и внутренних напряжений при термическом воздействии, прессовании заготовок в готовые изделия.

- ухудшение механических свойств в следствии нарушения химического состава (зоны повышенного или пониженного содержания связующего) и технологического процесса изготовления;

- расслоения, образующиеся в результате перерывов в литье или при сборке пакетов из неоднородных материалов, недостаточной очистки соединяемых поверхностей.

**Целью работы** является проверка возможности применения эхо-метода для выявление внутренних дефектов пластичных материалов.

**Методика экспериментального исследования**

Для проведения исследований был выбран призматической формы образец из материала ИЮПАК: Poly (methyl 2-methylpropenoate), который состоит из термопластичной смолы и имеет следующие характеристики:

-температура плавления: 160°С;

-плотность: 1,18 г/см³;

-температура кипения: 200°С.

Методы неразрушающего контроля позволяют обнаружить дефекты, посторонние включения и неоднородности без разрушения изделия [7-9]. Суть метода заключается в использовании проникающей способности ультразвуковых колебаний в материал и их отражения от поверхности раздела сред с различными акустическими свойствами. В экспериментальных условиях данный метод применялся для нахождения дефектов, измерения толщины, исследования мест сварки и качества соединений пластмассовых труб и фитингов. Из известных трех методов применения ультразвука для обнаружения внутренних дефектов: теневой, резонансный и эхо-метод [9-10] было принято решение остановиться на последнем.

Таблица 1 - Условия проведения эксперимента

| | |
|---|---|
| Объект контроля: | исследуемый образец |
| Материал: | ИЮПАК: Poly (methyl 2-methylpropenoate) |
| Метод контроля: | эхо-метод |
| Цель испытания: | -проверка экспериментального образца на наличие внутренних дефектов;<br>- заключение о дальнейшей пригодности заготовки. |
| Оборудование: | -дефектоскоп ультразвуковой «Пеленг» УД2-102;<br>-стандартный образец СО-1;<br>-прямой ПЭП с частотой 5МГц |
| Вспомогательное оборудование: | штангенциркуль |
| Критерий браковки: | эквивалентная площадь несплошности более 2 мм$^2$ |
| Вспомогательные материалы: | контактная жидкость «Гель ультразвуковой» |

Этапы испытания.

1. Подготовительные операции.

1.1. Очистить поверхность заготовки от загрязнений, препятствующих обеспечению акустического контакта. Нанести на поверхность сканирования контактную жидкость.

1.2. Подготовить дефектоскоп в соответствии с руководством по эксплуатации.

2. Настройка дефектоскопа (рисунок 1).

2.1. Установить основные параметры исследования:

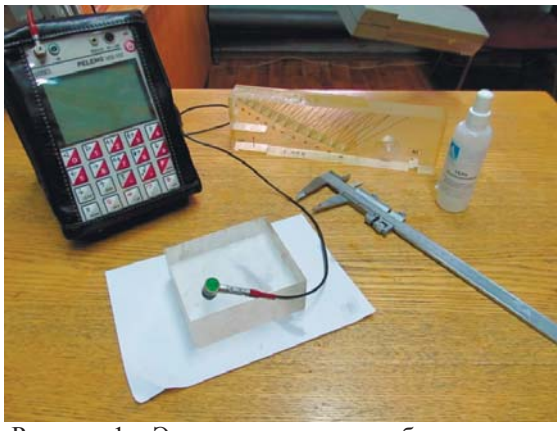


Рисунок 1 – Экспериментальное оборудование

Таблица 2

| | |
|---|---|
| акустический (ультразвуковой) метод контроля | эхо-метод |
| материал | оргстекло |
| скорость распространения ультразвука | 2670 м/с |
| частота | 5 МГц |
| угол ввода | $0^0$ |
| время ПЭП | 1,65 мк секунд |
| длина развертки | 48 |
| начало строба | 5 |
| конец строба | 38 |
| мертвая зона (минимальное расстояние от поверхности ввода до дефекта, выявляемого при контроле) | 5 мм |

2.2. Установить браковочный уровень чувствительности, при котором принимается решение об отнесении выявленной несплошности к классу "дефект". В данном испытании браковочный уровень чувствительности составляет 57 дБ, что дает возможность выявлять дефекты с эквивалентной площадью более 2 мм$^2$.

2.3. Настройка ВРЧ (временная развертка чувствительности).

3. Контроль заготовки детали.

4. Обработка результатов контроля. Принятие решения о возможности ее дальнейшего применения.

**Результаты и обсуждение**

В результате проведенных исследований была установлена возможность применения эхометода для пластичных материалов. В процессе экспериментальных исследований были выявлены недопустимые дефекты, которые заносились в память дефектоскопа в виде протокола контроля. На рисунке 2 представлена дефектограмма участка заготовки с выявленным внутренним дефектом, который отнесен к разряду недопустимых дефектом, так как амплитуда от эхо-сигнала превышает уровень выбраковки.

Графически фиксировалась дефектограмма выявленного дефекта с указанием данных о детали, выявленном дефекте и параметрах контроля.

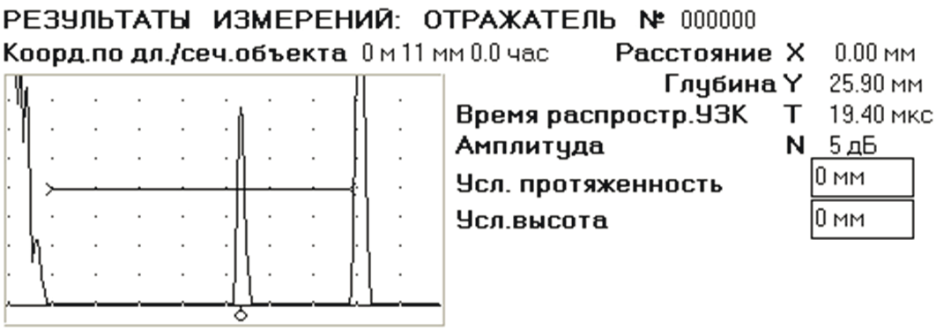



Рисунок 2 -Дефектограмма участка заготовки с выявленным внутренним дефектом

**Выводы**

Проведенные экспериментальные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. в заготовке из пластического материала ИЮПАК: Poly (methyl 2-methylpropenoate) на глубине 25,9 мм выявлен внутренний дефект в виде несплошности.
2. обнаруженная несплошность была отнесена с разряду недопустимых дефектов, так как амплитуда от эхо-сигнала превысила уровень браковки на 5 децибел.
3. дано заключение о невозможности дальнейшего использования заготовки для изготовления продукции.

## Список литературы

1. *Рогов В.А.* Современные машиностроительные материалы и заготовки: учеб. пособие для студентов высш.учеб. заведений / В.А.Рогов, Г.Г.Позняк. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с.
2. *Мозговой Н.И.* Особенности обработки отверстий в деталях из стеклопластика. / Н.И. Мозговой, Я.Г. Мозговая. Седьмая Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в промышленности» (ITI*2012) : тезисы докладов (30 – 31 октября 2012 года, Минск). – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2012. – С. 207-209. – ISBN 978-985-6744-78-8.
3. *Мозговой Н.И.* Исследования влияния физико-механических свойств стеклопластиков на процесс резания./ Н.И. Мозговой, Я.Г. Мозговая. Вестник Алтайской науки. Барнаул– 2013. - № 2-1. - С. 15-20.
4. *Мозговой Н.И.* Стеклопластик и особенности его механической обработки./ Н.И. Мозговой, А.М. Марков, М.В. Доц. LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG. Германия – 2012. 100 с.
5. *Мозговой Н.И.* Проблемы и перспективы применения пластических материалов для деталей машиностроения./ Н.И. Мозговой, А.М. Марков, Я.Г. Мозговая.Ползуновский альманах, №2/2013, Гл.редактор А.А. Ситников Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. – С. 92-95.
6. *Кобелев А.Г.* Материаловедение. Технология композиционных материалов: учебник / А.Г. Кобелев, М.А. Шаронов, О.А. Кобелев./ Изд-во: Кнорус, 2014. - 270 с.
7. *Калиниченко Н.П.* Визуальный и измерительный контроль: учебное пособие для подготовки специалистов I, II и III уровня / Н.П. Калиниченко, А.Н. Калиниченко; Томский политехнический университет. - Томск: Из-во Томского политехнического университета, 2009. - 300 с.
8. *Киселев Д.Ю.* Ультразвуковой эхоимпульсный метод неразрушающего контроля: методическое пособие/ Д.Ю. Киселев – Самара: СГАУ, 2010 (электронный ресурс).
9. Measurement technologies. Remote visual inspection. - USA: General Electric Company, 2007.
10. Advances in Three Dimensional Measurement in Remote Visual Inspection. 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012, Durban, South Africa. http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/320_wcndtfinal00320.pdf

## EXPERIMENTAL STUDIES OF INTERNAL DEFECTS OF PLASTIC MATERIALS BY NON-DESTRUCTIVE TESTING

**Mozgovoy N.I.,** Ph.D. (Engineering) e-mail: nick_3@mail.ru,

**Mozgovaya Y.G.,** Ph.D. (Engineering) e-mail: yanagm@mail.ru,
**Pashkova E.A.,** e-mail: student genya_pashkova@mail.ru

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenin prospect, Barnaul, Aitai region, 656038, Russian Federation

**Abstract:** We consider the control of modern plastic materials acoustic emission method after machining. These materials are widely used in the production of machine parts, for being menitelyami-ferrous metals (lead, copper, zinc, brass, bronze) and rare materials with specific physical and mechanical properties (alloyed steels). The production conditions for measurement and control of material properties is necessary to destroy the integrity of the test sample, which is often costly and time. The research of plastic materials can detect internal defects, debris and heterogeneity without destroying the product NDT methods, in particular the echo method.

**Key words:** non-destructive testing, the echo method, ultrasound, plastic materials, surface quality, process control, processing of materials.

**УДК 62-133**

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ НА РАБОЧЕМ ОРГАНЕ ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

*А.А. ПРИХОДЬКО*[1], *аспирант*,
*А.И.СМЕЛЯГИН*[1], *доктор техн. наук, профессор*,
([1]*КубГТУ, г. Краснодар, Россия*)

Приходько А.А. – 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
Кубанский государственный технологический университет,
e-mail: sannic92@gmail.com

**Аннотация**: Перемешивающие устройства используются для проведения большинства химических и технологических процессов. В предыдущих работах показано, что наиболее эффективными и перспективными в настоящее время являются возвратно-вращательные перемешивающие устройства. Для рационального проектирования устройств необходимо построить динамическую модель и провести ее исследование. Анализ литературы по данной тематике показал, что момент сопротивления на рабочем органе перемешивающего устройства, необходимый для проведения динамических исследований, оценен только приближенно. Поэтому в работе выведены формулы для определения момента сопротивления на рабочем органе перемешивающего устройства.

**Ключевые слова:** возвратно-вращательное перемешивающее устройство, сила сопротивления, момент сопротивления среды, динамический анализ.

**Введение**

Перемешивающие устройства широко применяются в различных отраслях промышленности для интенсификации химических, тепловых и массообменных процессов, для получения растворов, эмульсий и суспензий.

В настоящее время наиболее распространенными и исследованными являются классические вращательные перемешивающие устройства [1]. Однако они не всегда позволяют быстро и эффективно достичь требуемого качества получаемого продукта. Ряд работ посвящен разработке и исследованию перемешивающих устройств со сложным движением рабочих органов [2, 3], однако такие устройства не получили широкого распространения из-за сложности и невысокой надежности конструкции. Наиболее современными и перспективными являются вибрационные перемешивающие устройства [4, 5]. Они позволяют сократить время протекания многих процессов в 1,5-2 раза, удельные капитальные и эксплуатационные затраты в 1,2-1,8 раза.

Вибрационные перемешивающие устройства с возвратно-поступательным движением рабочих органов обладают следующими недостатками: вертикальные вибрации, которые передаются в окружающую среду и усложняют работу оператора, а также быстрый износ уплотнений, вследствие чего такие устройства не могут применяться в реакторах под давлением. Таким образом, создание и исследование возвратно-вращательных перемешивающих устройств (ВВПУ), которые лишены вышеперечисленных недостатков, является важной и актуальной задачей.

В работе [6] проведен структурный синтез перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов. Схема такого устройства представлена на рисунке 1.

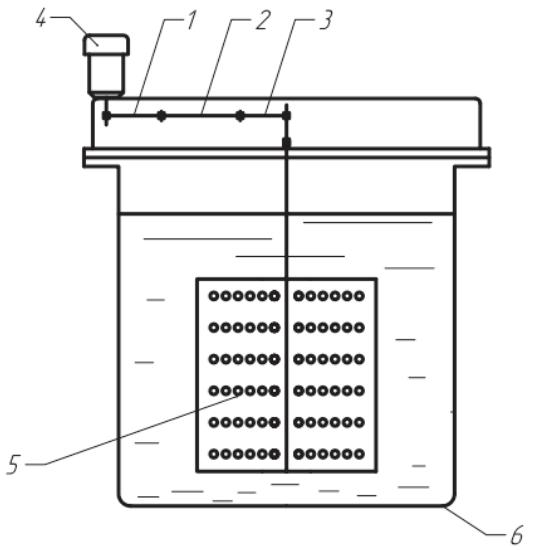



Рисунок 1 – Перемешивающее устройство

Перемешивающее устройство работает следующим образом [7]. Движение от двигателя 4 передается через кривошип 1, шатун 2 и коромысло 3 валу с рабочим органом 5, что приводит к перемешиванию жидкой среды в реакторе 6.

Для построения динамической модели и динамического анализа машины необходимо найти момент сопротивления среды, который действует на рабочий орган перемешивающего устройства.

**Теория**

Параметром, определяющим режим движения перемешиваемой среды, является число Рейнольдса. В работе [8] предлагается следующая формула для определения числа Рейнольдса при возвратно-вращательном движении рабочего органа:

$$\mathrm{Re} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \cdot (\alpha \cdot h) \cdot f / \nu, \qquad (1)$$

где $S = l_{ро} \cdot 2h_{ро}$ – площадь рабочего органа; $\alpha$ – угол возвратно-вращательных колебаний рабочего органа, $h$ – расстояние от исследуемого элемента рабочего органа до оси вращения; $f$ – частота колебаний рабочего органа; $\nu$ – кинематическая вязкость жидкости.

Согласно [9] при $Re$<100 сопротивление среды пропорционально скорости, а при $Re$>100 описывается квадратичным законом, то есть:

$$\begin{aligned} F_{вяз} &= B_{вяз} \cdot \upsilon \quad при \quad \mathrm{Re} < 100 \\ F_{кв} &= B_{кв} \cdot \upsilon^2 \quad при \quad \mathrm{Re} > 100 \end{aligned}, \qquad (2)$$

где $B_{вяз}$, $B_{кв}$ – коэффициенты вязкого и квадратичного сопротивления, $[B_{вяз}] = \frac{н \cdot с}{м}$, $[B_{кв}] = \frac{н \cdot с^2}{м^2}$; $F_{вяз}$, $F_{кв}$ – сила вязкого и квадратичного сопротивления среды; $\upsilon$ – скорость рабочего органа.

Так как линейная скорость для различных точек рабочего органа переменна, то на рабочий орган ВВПУ будет действовать как вязкое, так и квадратичное сопротивление (рис. 2).

На рисунке 2 представлена распределенная нагрузка, действующая на рабочий орган при его вращательном движении. Так как вид силы сопротивления определяется движением потока жидкости, то существует граница, на которой изменяется закон сопротивления среды. Эта граница ($h_x$) определится из формулы (1) при $Re$=100:

$$h_x = \frac{100 \cdot \nu}{\alpha \cdot f} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4S}}. \qquad (3)$$

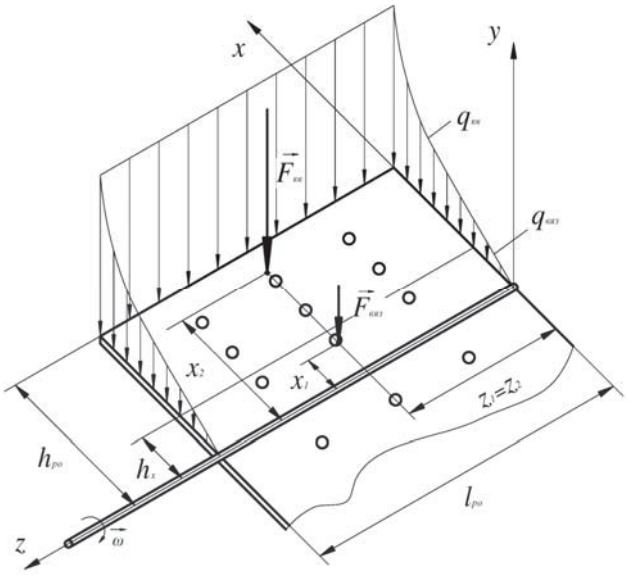



Рисунок 2 – Расчетная схема

Учитывая (2), интенсивности нагрузок, действующих на рабочий орган, определятся по формулам:

$$\begin{aligned} q_{вяз} &= B'_{вяз} \cdot \upsilon \\ q_{кв} &= B'_{кв} \cdot \upsilon^2 \end{aligned}, \qquad (4)$$

где $B'_{вяз}$, $B'_{кв}$ – приведенные коэффициенты вязкого и квадратичного трения, $[B'_{вяз}] = \frac{н \cdot с}{м^3}$, $[B'_{кв}] = \frac{н \cdot с^2}{м^4}$.

Заменим распределенные нагрузки $q_{вяз}$ и $q_{кв}$ сосредоточенными силами $F_{вяз}$ и $F_{кв}$. Эквивалентная сила для нагрузок, распределенных по площади, определяется по формуле [10, 11]:

$$F = \int q(S) dS. \qquad (5)$$

Тогда, учитывая (4), получим:

$$\begin{aligned} F_{вяз} &= \int_0^{h_x} B'_{вяз} \cdot \upsilon \cdot d(l_{ро} \cdot h); \\ F_{кв} &= \int_{h_x}^{h_{ро}} B'_{кв} \cdot \upsilon^2 \cdot d(l_{ро} \cdot h). \end{aligned} \qquad (6)$$

Подставляя $\upsilon = \omega \cdot h$, получим:

$$\begin{aligned} F_{вяз} &= B'_{вяз} \cdot \omega \cdot l_{ро} \cdot \frac{h_x^2}{2}; \\ F_{кв} &= B'_{кв} \cdot \omega^2 \cdot l_{ро} \cdot \frac{h_{ро}^3 - h_x^3}{3}. \end{aligned} \qquad (7)$$

Силы $F_{вяз}$ и $F_{кв}$ приложены в центрах тяжести ($A_1$ и $A_2$) фигур, ограниченных поверхностью рабочего органа и поверхностями $q(S)$ (рис. 2). Координаты $x_1$ и $x_2$ центров тяжести (рис. 2) определятся по формуле [11]:

$$x_1 = \frac{S_y}{S} = \frac{\int xdS}{\int dS} = \frac{\int_0^{h_x} h \cdot B'_{вяз} \cdot \omega \cdot hdh}{\int_0^{h_x} B'_{вяз} \cdot \omega \cdot hdh} = \frac{2}{3} h_x;$$

$$x_2 = \frac{S_y}{S} = \frac{\int xdS}{\int dS} = \frac{\int_{h_x}^{h_{po}} h \cdot B'_{кв} \cdot \omega^2 \cdot h^2 dh}{\int_{h_x}^{h_{po}} B'_{кв} \cdot \omega^2 \cdot h^2 dh} = \frac{3}{4} \cdot \frac{h_{po}^4 - h_x^4}{h_{po}^3 - h_x^3}. \quad (8)$$

Координаты $z_1$ и $z_2$ центров тяжести (рис. 2) равны:

$$z_1 = z_2 = \frac{l_{po}}{2}. \quad (9)$$

Так как рабочий орган может иметь не только одну, но и $n$ лопастей, то момент сопротивления среды определится по формуле:

$$M = n \cdot F_{вяз} \cdot x_1 + n \cdot F_{кв} \cdot x_2. \quad (10)$$

Подставляя (7), (8), получим:

$$M = \frac{n}{3} B'_{вяз} \cdot \omega \cdot l_{po} \cdot h_x^3 + \frac{n}{4} B'_{кв} \cdot \omega^2 \cdot l_{po} (h_{po}^4 - h_x^4). \quad (11)$$

**Результаты и обсуждение**

Уравнение (11) позволяет определить момент сопротивления на рабочем органе в общем случае перемешивания жидкой среды в реакторе – когда наблюдается и ламинарный, и турбулентный режимы движения.

При малых углах и (или) частотах колебаний рабочего органа может наблюдаться ламинарный режим движения. Полностью ламинарное движение наблюдается при условии:

$$h_x = \frac{100 \cdot \nu}{\alpha \cdot f} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4S}} \geq h_{po}. \quad (12)$$

При таком движении будет действовать только линейное сопротивление и формула (11) примет вид:

$$M = \frac{n}{3} B'_{вяз} \cdot \omega \cdot l_{po} \cdot h_{po}^3. \quad (13)$$

При больших углах и (или) частотах колебаний рабочего органа может наблюдаться турбулентный режим движения. Полностью турбулентное движение наблюдается при условии:

$$h_x = \frac{100 \cdot \nu}{\alpha \cdot f} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4S}} \leq r_в, \quad (14)$$

где $r_в$ – радиус вала рабочего органа.

При таком движении линейным сопротивлением можно пренебречь и формула (11) примет вид:

$$M = \frac{n}{4} B'_{кв} \cdot \omega^2 \cdot l_{po} \cdot h_{po}^4. \quad (15)$$

**Выводы**

Таким образом, в работе получены формулы для определения момента сопротивления жидкой среды на рабочем органе возвратно-вращательного перемешивающего устройства. Приведенные коэффициенты $B'_{вяз}$ и $B'_{кв}$, также как и $B_{вяз}$ и $B_{кв}$, определяются экспериментально и зависят от количества отверстий на рабочем органе, их формы и размеров, а также от вязкости перемешиваемой среды и т.д.

Полученные зависимости необходимы для построения динамической модели ВВПУ и проведения ее анализа.

## Список литературы

. 1. *Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М.* Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. – Л.: Химия, 1984. – 336 с.

2. Пат. 2113897 РФ, МПК[6] B 01 F 13/00. Устройство для перемешивания / А.И. Смелягин, В.Г. Сачков, Н.А. Чусовитин; заявитель и патентообладатель Новосиб. гос. тех. ун-т. – № 96109653/25 ; заявл. 13.05.1996 ; опубл. 27.10.98, Бюл. № 18.

3. *Мудров, А.Г.* Разработка пространственных перемешивающих устройств нового поколения, применяемых в сельском хозяйстве и промышленности (Том 1) : дис. … д-ра техн. наук: 05.20.01, 05.02.18 / Мудров Александр Григорьевич. – Казань, 1999. – 493 с.

4. *Ткаченко Р.Н., Христюк В.Т., Смелягин А.И.* Влияние вибрационной обработки мезги винограда на химический состав виноматериалов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2011. – № 10. – с. 52-55.

5. *Смелягин А.И., Юхневич И.В.* Структурный синтез и кинематический анализ простых исполнительных механизмов виброперемешивающих устройств // Омский научный вестник. – 2012. – № 3 (113). – с. 72-75.

6. *Смелягин А.И., Приходько А.А.* Структурный синтез сложного исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства // Известия вузов. Пищевая технология. – 2014. – № 5-6. – с. 85-88.

7. Пат. 152110 РФ, МПК[7] B01F 7/16. Перемешивающее устройство / А.А. Приходько, А.И. Смелягин; заявитель и патентообладатель Кубанский гос. технол. ун-т. – № 2015103695/05 ; заявл. 04.02.2015 ; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13.

8. *Смелягин А.И., Юхневич И.В.* Динамический анализ исполнительных

механизмов возвратно-вращательных перемешивающих устройств // Проблемы механики современных машин: Материалы V международной конференции. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. – Т. 1. – с. 155-159.

9. *Осипов А.В.* Расчет амплитуды колебаний виброперемешивающих устройств // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1979. – № 7. – с. 8-9.

10. *Тарг С.М.* Краткий курс теоретической механики: Учеб. для втузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 416 с.

11. *Сорокин В.Н.* Краткий курс теоретической механики. URL: http://termeh-sorokin.on.ufanet.ru/statika/2.9.s.htm (Дата обращения: 08.06.15).

## DETERMINATION OF IMPELLER RESISTANT MOMENT IN RECIPROCATING-ROTATIONAL STIRRED TANK

**Prikhod'ko A.A.**[1], post-graduate student, e-mail: sannic92@gmail.com
**Smelyagin A. I.**[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: asmelyagin@yandex.ru

[1]Kuban State Technological University, 2 street Moskovskaya, Krasnodar, 350072, Russian Federation

**Abstract**: Stirred tanks are used for most chemical and technological processes. In previous studies it was shown that the most effective and upcoming are reciprocating-rotational stirred tanks. For the rational design of devices it's necessary to build a dynamic model and to conduct its investigation. Analysis of the scientific works on the subject shows that the resistance moment required for dynamic studies, estimated only approximately. Therefore, there are derived equations for determining the resistance moment of stirred tank impeller.

**Keywords:** reciprocating-rotational stirred tank, the resistance force, the resistance moment, dynamic analysis.

**УДК 621.83**

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРИВОДНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ПЕРЕДАЧ СО СВОБОДНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

*А.Н. РОМАШЕВ, канд. техн. наук, доцент,*
*(БТИ АлтГТУ, г. Бийск, Россия)*

Ромашев А.Н. – 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Бийский технологический институт АлтГТУ (БТИ АлтГТУ)
e-mail: mrsi@bti.secna.ru

**Аннотация**. В статье представлены возможности и отличительные особенности малогабаритных механических приводных систем на базе передач со свободными телами качения, которые могут быть использованы в разнообразных устройствах функционального и технологического назначения. Преимуществами таких передач являются компактность, многопоточность, частичная или почти полная замена трения скольжения трением качения. Это выражается в повышении надежности, улучшении удобства эксплуатации, а так же в упрощении конструкции и сокращении общих габаритных размеров.

**Ключевые слова:** волновые передачи с промежуточными элементами, передачи со свободными телами качения, силовые передаточные механизмы,

**Введение.** Во всех отраслях промышленности широко применяются механические передачи. Наиболее характерным примером реализации механических передач является создание надежных и малогабаритных редукторов, повышение их нагрузочной способности, снижение трудоемкости изготовления и материалоемкости при одновременном снижении их стоимостных показателей – все это целый комплекс актуальных задач, стоящих перед конструкторами и технологами, связанными с разработкой новой техники. Для создания механических передач и редуцирующих узлов на их основе чаще всего применяют зубчатые зацепления, которые имеют многовековую историю развития и проверенные практикой методики проектных и проверочных расчетов. Многими исследователями признается тот факт, что зубчатые передачи в традиционном исполнении исследованы досконально и резервы повышения их эксплуатационных характеристик если не исчерпаны, то близки к исчерпанию. При этом процессы качения со скольжением осуществляются и при работе зубчатых передач всех типов.

Помимо традиционных зубчатых зацеплений в последнее время активно внедряются новые виды механических передач, в частности, волновые передачи с промежуточными элементами, которые с успехом применяются для создания компактных приводной техники. Малогабаритные механические приводные системы на базе передач со свободными телами качения могут быть предназначены для передачи полезных усилий в труднодоступные места (трубы, скважины), для встраивания в различные трубчатые корпуса баллонных ключей, гайковертов, устройств, работающих в скважинах и т.д. В основу разработки такой техники положены механические передачи нового типа с использованием системы тел качения для передачи нагрузки. Тела качения в процессе работы совершают согласованное волнообразное движение, контактируя с беговыми дорожками основных звеньев передачи. Преимуществами таких передач являются компактность, многопоточность, частичная или почти полная замена трения скольжения трением качения.

**Постановка задачи**. Механические передачи выполняют функции изменения значений вращающего момента и угловой скорости. Современные механические передачи должны обеспечивать изменение вращения с минимальными значениями механических потерь, а также с относительно постоянным значением коэффициента редуцирования или мультипликации, что характеризует плавность работы привода.

Данные передачи в СССР получили импульс развития в 60-70-х годах прошлого столетия. В Томске и Могилеве были созданы научные школы, разрабатывавшие привода на основе ПСТК. Синусошариковые передачи использовались для создания редукторов-шпинделей турбобуров и электробуров [3], а также устройств для развинчивания колонны бурильных труб.

За рубежом в настоящее время работы в направлении создания планетарных редукторов с ПСТК проводят фирмы и исследователи: Synkinetics и Advanced Energy Concepts 81 (США), Bollman Hydraulik GmbH (Германия), Imase Kenji (Япония), Axial Wave Drive (Нидерланды) и др. Анализ патентной литературы свидетельствует о значительной патентной активности по данному направлению фирм из Японии, Южной Кореи и особенно из Китая. То, что в последние годы работы по данному направлению в России

активизировались, также говорит о перспективности исследований в этой области. ОАО «Редуктор» (Ижевск, Российская Федерация) и ЗАО «Томские трансмиссионные системы» в 2006–2007 гг. наладили серийный выпуск «редукторов-подшипников» [3]. Известны разработки «Сибирской машиностроительной компании», получившие серийное внедрение. Серийно выпускаются приводы запорной арматуры, редукторы и мотор-редукторы для бетономешалок, механические ключи для демонтажа и сборки колес автомобилей КамАЗ и др.

До недавнего времени широкое применение подобных механизмов в промышленности сдерживала технологическая база, отсутствие станочного оборудования, с помощью которого возможно было бы решить задачи качественного изготовления пространственных поверхностей и беговых дорожек. Существующий в настоящее время парк станков с ЧПУ позволяет обрабатывать поверхности практически любой сложности, а появившиеся возможности компьютерного моделирования значительно упрощают и ускоряют процесс проектирования.

**Результаты и обсуждение.** Передача со свободными телами качения (ПСТК) является уникальной разработкой в области силовых зацеплений. Она обладает большими передаточными числами, высокими ресурсом работы и КПД, обеспечивает передачу высоких крутящих моментов при малых габаритах, плавность и бесшумность работы [1]. На базе таких передач созданы новые высокоэффективные силовые передаточные механизмы — редукторы и мультипликаторы, обладающие качественно новыми ресурсными и силовыми характеристиками, превосходящими известные аналоги.

Основные особенности и преимущества передач со свободными телами качения [2]:

*Высокое передаточное число*.

Диапазон передаточных отношений редукторов ПСТК:

одноступенчатых — 9...60,

двухступенчатых — до 3500;

дифференциальных — до 1000;

многоступенчатых — свыше 1000000.

Передачи со свободными телами качения позволяют очень компактно реализовать большие передаточные числа. При этом ступени передачи можно располагать последовательно («ступень за ступенью» в осевом направлении) и параллельно («ступень над ступенью» в диаметральном направлении). При расположении ступеней в осевом направлении при очень малом диаметре редуктора можно реализовывать большие передаточные числа до миллиона в четырех ступенях.

МР-ШД привод раскрытия солнечных батарей [2]
Передаточное число 13824
Крутящий момент, Нм 20
Частота вращения выходного вала, об./мин. 0,1
МР-ДПР привод раскрытия антенн [2]
Передаточное число 2548
Крутящий момент, Нм 10
Частота вращения выходного вала, об./мин. 2,35

Высокие крутящие моменты на выходном звене, большие перегрузочные резервы и высокая жесткость кинематических звеньев.

В конструкции ПСТК нагрузка передается с помощью шариков или роликов с углом зацепления от 90° до 180°. То есть при передаточном отношении на одной ступени — 60, в зацеплении одновременно находится до 30 тел качения, что позволяет передавать крутящие моменты в 5–10 раз больше относительно зубчатых передач, с многократной кратковременной перегрузкой и практически без упругих деформаций при равных массогабаритных показателях.

*Высокий КПД.*

КПД ПСТК составляет 0,8–0,9, в бессепараторной конструкции передачи — 0,97.

*Компактность.*

По сравнению с зубчатой передачей, при равных передаточных числах и крутящих моментах, ПСТК меньше по габаритам в 2–6 раз, в зависимости от типоразмера.

*Малый угловой зазор.*

За счет большой жесткости кинематических звеньев ПСТК при номинальных нагрузках общий угловой зазор (люфт) составляет в градусах: особо точные — до 0,05; повышенной точности — до 0,12; нормальной точности — до 0,8.

*Высокая надежность и продолжительный срок службы.*

Передача с промежуточными звеньями обладает простой компоновкой, прочной конструкцией и длительным сроком службы. Применение пластичной смазки в конструкции не требует контроля ее уровня и значительно уменьшает затраты на техническое обслуживание. При применении перманентной смазки имеется возможность создания специальных необслуживаемых механизмов со сроком службы до 15 лет.

Данный вид передач может быть использован не только в качестве функциональных устройств, но и устройств технологического назначения. Например, для модернизации различных приводных механизмов, используемых в конструкциях узлов металлорежущего оборудования (пиноль задней бабки, механизированный патрон, револьверная головка, устройство для удаления стружки и другие). В конструкциях этих передач тела качения одновременно с передачей крутящего момента воспринимают радиальную нагрузку, что позволяет совместить функцию редуктора и опорного устройства, обеспечивая существенное снижение размеров и веса. На основе такой передачи выполнена раз-

работка опытного образца ускорительной головки для станков с ЧПУ.

Существуют конструкции технологической оснастки, позволяющие автоматически реализовать реверс, при этом вращение в обратном направлении может происходить с увеличенной частотой за счет используемого зубчатого редуктора [4]. На кафедре МРСиИ Бийского технологического института ведутся работы по конструированию и изготовлению опытного образца реверсивного резьбонарезного патрона. Отличительной особенностью данного технологического устройства от существующих аналогов является то, что внутреннее его устройство выполнено на основе двухсекционной передачи со свободными телами качения.

**Выводы.** Технический результат, обеспечиваемый применением передач со свободными телами качения, выражается в повышении надежности, улучшении удобства эксплуатации, а так же в упрощении конструкции и сокращении общих габаритных размеров. Так же можно отметить то, что стоимость изготовления деталей редуцирующих узлов конструкций в 2-3 раза ниже, чем деталей редукторов с зубчатыми колесами.

## Список литературы

1. *Шумский В.В.,* Волновые редукторы нового поколения в нефтегазовой промышленности / В.В. Шумский, Э.Н. Панкратов, Р.Н. Карасев // С-Пб. "НефтьГазПромышленность" – 2007. – №7 (35).

2. http://www.smc.tomsk.ru/ru/2/

3. *Лустенков М. Е.* Структурные резервы повышения КПД передач с промежуточными телами качения / М.Е. Лустенков, А.П. Прудников // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2010. – № 3. – С. 18–24.

4. www.tapmatic.com

## TECHNOLOGICAL AND FUNCTIONAL ACTUATING UNITS ON THE BASIS OF TRANSMISSIONS WITH THE FREE ROLLING BODIES

**Romashev A.N**., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mrsi@bti.secna.ru
Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU, 27 street Trofimova, Biysk, Altai Krai, 659305, Russian Federation

**Abstract**. Opportunities and distinctiveness of small-size mechanical drive systems on the basis of transfers with the free bodies of a rolling which can be used in various devices of the functional and technological purpose are presented in article. Advantages of such transfers are compactness, a multithreading, the complete replacement of sliding friction with a rolling friction partial or nearly. It is expressed in reliability increase, improvement of convenience of operation, and also in simplification of a design and reduction of the common overall dimensions.

**Keywords**: Wave transfers with intermediate elements, transfers with free rolling bodies, power transmission mechanisms

**УДК 631.81:636.085**

# ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДИСМЕМБРАТОРА ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

*А.А. СИТНИКОВ,[1]доктор техн. наук, профессор*
*Н.А. Макарова[1], аспирант*
*Ю.Н. Камышов, кандидат техн. наук*
*([1]АлтГТУ, г. Барнаул, Россия)*

Ситников А.А. – 656038, г. Барнаул, пр-кт Ленина, 46
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: sitalan@mail.ru

**Аннотация:** Авторами разработана методика оптимизации конструктивных параметров дисмембратора для приготовления жидких кормов. Оптимизация проводилась нейронной сетью на основе данных конечноэлементного анализа. В ходе виртуального эксперимента получены диаграммы давления и температуры жидкости внутри рабочих органов. На основе результатов оптимизации разработана конструкция рабочих органов дисмембратора. Сравнение конструкции с прототипом выявило преимущества конструкции оптимизированной геометрии.

**Ключевые слова:** Оптимизация конструкции, дисмембраторы, жидкие корма, конечноэлментный анализ

**1.Введение.** Дисмембраторы – разновидность стержневых дробилок, рабочие органы которых выполнены в виде ротора и статора, на поверхности которых расположены зубья. Широко распространены в химической, обрабатывающей промышленности, в сельском хозяйстве. В частности, в [1] доказано, что дисмембраторы хорошо подходят для производства высокоэффективных жидких кормов.

Существуют разные подходы к конструированию рабочих органов, используемых в сельском хозяйстве. Например, авторы дисмембратора [2] выполнили измельчающие элементы в виде зубьев трапециевидной формы. При этом нет указания на взаимное расположение зубьев, их размер, количество рядов измельчающих элементов. А дисмембратор для гомогенизированных продуктов [3] проектировался так, чтобы конструкция имела наименьшее возможное энергопотребление.

Многие исследователи (Сергеев Н.С., Камышов Ю.Н., Золотарев С.В., Червяков В.М.) занимались обоснованием конструктивных параметров для установок схожих типов. Но на данный момент не разработано подходящей методики по расчету эффективных конструкций дисмембраторов для приготовления жидких кормов.

Таким образом, целью исследования является разработка методики оптимизации конструктивных параметров центробежно-роторных дисмембраторов для приготовления жидких кормов.

**2. Теория.** Алгоритм проведения оптимизации конструктивных параметров центробежно-роторного дисмембратора состоит из следующих этапов.

1 этап – компьютерный эксперимент с рабочими органами установки. Была разработана методика виртуального эксперимента, позволяющая оценить модуль помола зерна, температуру смеси и производительность установки.

В основе математической модели лежит система нестационарных уравнений Навье-Стокса в их консервативной форме. В данном случае исследуется жидкость, в которой идут процессы теплопроводности и внутреннего трения, поэтому в систему включается уравнение переноса тепла, а замыкается система уравнениями плотности и теплоемкости как функции от независимых переменных давления и температуры. Система уравнений решалась при помощи программы конечно-элементного анализа Ansys CFX.

2 этап – оптимизация геометрии при помощи нейронной сети.

Для этого сначала была проведена параметризация ротора и статора и установлены целевые значения показателей модуля помола, температуры смеси и производительности установки.

Далее необходимо было получить обучающую выборку. Данная Так как провести натурных эксперимент на большом количестве вариантов установок не представляется возможным, проводился виртуальный эксперимент.

Был разработан план проведения виртуального эксперимента, проведен эксперимент и получены результаты. Далее по этим результатам была построена регрессионная модель и получена обучающая выборка. После примене-

ния нейронной сети были получены параметры оптимизированной модели рабочих органов дисмембратора, позволяющие достичь заданных целевых параметров.

**3. Результаты и обсуждение.** При анализе результатов моделирования выявлены следующие закономерности:

- на диаграммах (Рисунок 1) отчетливо видны зоны с повышенным давлением и зоны разряжения. Зоны повышенного давления образуются в момент, когда поток жидкости наталкивается на движущийся зуб рабочего органа. В этот момент жидкость ведет себя как сжимаемая и происходит скачок давления. Создаются условия для возникновения гидроудара;

- вследствие сжимаемости жидкости в момент столкновения потока с зубом происходит возрастание температуры потока (Рисунок 2), т.к. уменьшается расстояние между молекулами жидкости и повышается кинетическая энергия.

После оптимизации конструктивных параметров была разработана оптимизированная геометрия рабочих органов дисмембратора для производства жидких кормов. Экспериментальное сравнение с прототипом выявило преимущества оптимизированной конструкции.

На рисунке 3 представлены графики средних значений температуры в зависимости от времени.

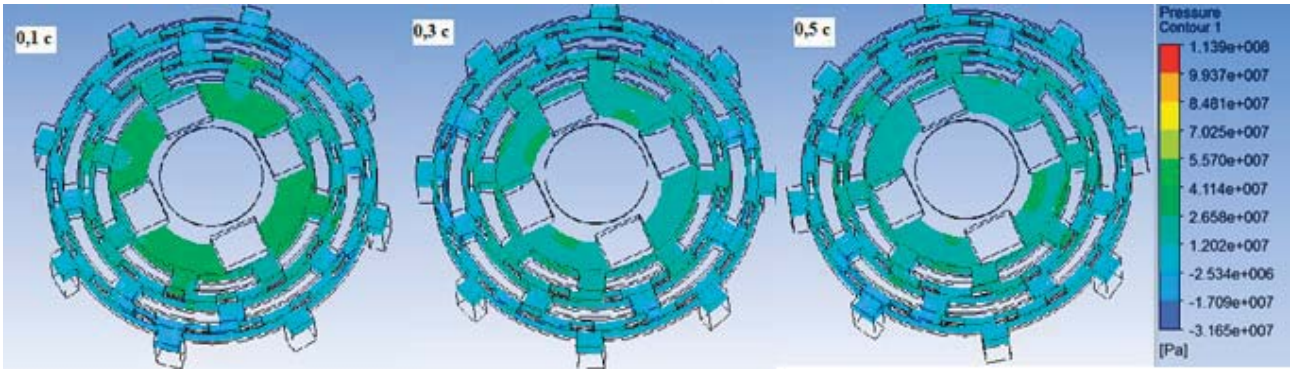



Рисунок 1 – контурные диаграммы давления жидкости внутри рабочих органов дисмембратора

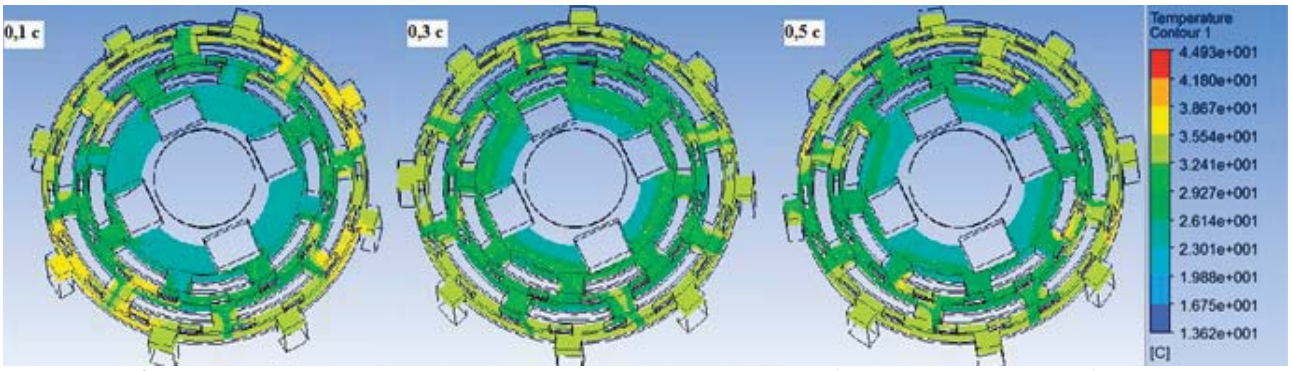



Рисунок 2 – контурные диаграммы температуры жидкости внутри рабочих органов дисмембратора

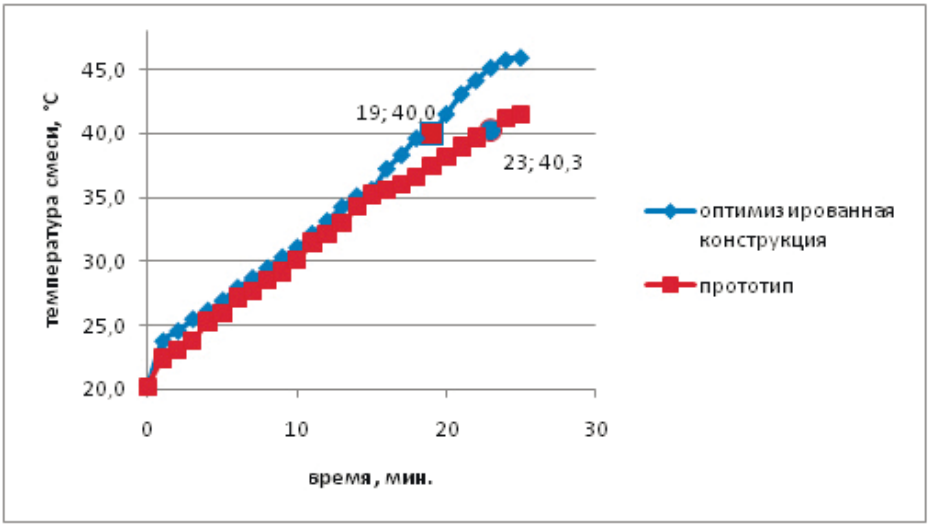



Рисунок 3 – Зависимость температуры смеси от времени протекания процесса

График зависимости оптимизированной конструкции имеет более крутой подъем. Это свидетельствует о более быстром нагреве смеси. Данный результат объясняется больше шириной зубьев у оптимизированной конструкции по сравнению с прототипом. Смесь дольше трется о стенки ротора и статора, а значит и быстрее нагревается.

Также важным результатом является то, что смесь в оптимизированной конструкции достигает заданной температуры (40°С – рекомендуемая температура жидкого корма) на 4 минуты быстрее (за 19 минут), чем в прототипе (за 24 минуты).

**4. Выводы**. Таким образом, была разработана методика оптимизации конструктивных параметров дисмембратора для приготовления жидких кормов. По данной методике получена конструкция, превосходящая прототип по скорости нагрева зерновой смеси.

## Список литературы.

1) *Камышов Ю.Н.* Обоснование конструктивных параметров рабочих органов дисмембраторов для получения жидких кормовых смесей/Дисс. На соиск. Уч. Степени к.т.н.- 2011, Барнаул – 43 с.

2) Пат. 2018360 Российская Федерация, МПК B02C13/24. Дисмембратор / Печерских Ю.Ф., Иштулов А.Г., Углов В.М., Исупов В.В.. – заявл. 03.11.1992 ; опубл. 30.08.1994.

3) Пат. 2466795 Российская Федерация, МПК B02C13/00. Дисмембратор для приготовления гомогенизированных продуктов / Ситников Александр Андреевич, Нефедов Евгений Николаевич, Нефедов Константин Евгеньевич, Дрюк Виктор Андреевич, Салеев Фарид Исмаилович, Почтер Сергей Валерьевич, Камышов Юрий Николаевич – заявл. 08.09.2010 ; опубл. 20.03.2012.

## NEURAL NETWORK OPTIMIZATION OF DISMEMBRATOR'S WORKING BODIES' GEOMETRY

**Sitnikov A.A.**[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: sitalan@mail.ru
**Makarova N.A.**[1], post-graduate, e-mail nmakarova22@gmail.com
**Kamyshov Yu.N.**[1], C.Sc. (Engineering), e-mail: kamishovun@mail.ru

[1]Altai State Technical University, 46, prospect Lenina, Barnaul, 656038, Russian Federation

**Abstract**: The authors have developed a design parameters' optimization method for dismembrator. Optimization was performed by a neural network based on finite element analysis. In the virtual experiment received a chart of pressure and temperature of the liquid inside the working bodies. Based on the results of design optimization working bodies of dismembrator was developed. Comparing the constraction with a prototype revealed advantages of the design of optimized geometry.

**Keywords:** Design optimization, neural network, finite element analysis, dismembrator, liquid feeds.

**УДК 621.01**

# СОВРЕМЕННЫЕ АКСИОМЫ И СЛЕДСТВИЯ ИЗ НИХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ МАШИН

*А.И.СМЕЛЯГИН*[1], *доктор техн. наук, профессор*,
([1]*КубГТУ, г. Краснодар, Россия*)

Смелягин А. И. – 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
Кубанский государственный технологический университет,
e-mail: asmelyagin@yandex.ru

**Аннотация:** Машины состоят только из звеньев (материальных тел) и кинематических пар (связей). Динамический анализ машин проводят либо с помощью законов Ньютона, либо уравнений и теорем, полученных из этих законов. Однако так как законы Ньютона сформулированы только для материальной точки, то применять их к исследованию машин некорректно. Поэтому в работе сформулированы основные новые аксиомы и принципы движения материальных тел. Выведены основные следствия, необходимые для исследования динамики машин. Уточнена и откорректирована терминология, которая используется при исследовании движения звеньев при наложенных на них связей.

**Ключевые слова:** машина, звено, материальное тело, кинематическая пара, связь, закон, аксиома, принцип, следствие, динамика машин.

**Введение**

Все машины и механизмы, какими бы они не были сложными, состоят только из звеньев (материальных тел, деталей), которые, чтобы совершать требуемые движения, определенным образом взаимосвязаны между собой с помощью и кинематических пар (связей).

Наиболее важным этапом при разработке машин является их динамический анализ. Именно на этом этапе устанавливается отвечает или нет разрабатываемая машина техническому заданию и принимается решение по её дальнейшей разработке.

При динамическом анализе машин, используют либо непосредственно законы Ньютона, либо уравнения, полученные из этих законов. Но законы Ньютона справедливы только для не существующего в природе объекта – материальной точки. Следовательно, законы Ньютона и полученные на их основе формулы, уравнения и теоремы не могут непосредственно применяться к исследованию машин.

Изучением механического движения, при скоростях исследуемых объектов значительно меньших скорости света, занимается классическая механика. Несмотря на то, что классическая механика постоянно развивается, ее основные законы были сформулированы более 300 лет назад Галилеем, Ньютоном и Эйлером и остаются незыблемыми.

Однако любая развивающаяся наука не может в своей основе иметь законы, представляющие собой «вечные» истины. Неоспоримые истины (законы), как показывает практика, только:

- тормозят развитие науки;
- приводят к нелогичности и некорректности многих формулировок, понятий, теорем, научных и методических работ, монографий, учебников, курсов;
- формируют не правильные представления об окружающем мире;
- усложняют восприятие и понятие основных положений и идей.

В настоящей работе предпринимается попытка навести порядок в терминологии современных наук о природе, прежде всего в физике и механике, и сформулировать отвечающие современным взглядам аксиомы (законы), взаимодействия и движения материальных объектов.

Для того чтобы строить (создавать) любую разумную теорию, прежде всего, надо определиться с терминологией. К сожалению, в современном мире, многие слова, понятия и термины, включая и научные, однозначно не определены и имеют широкие, порой даже взаимоисключающие смысловые значения, а то и вовсе бессмысленны и не верны [1]. Некорректность терминов особенно пагубно сказывается в науке и, зачастую, приводит к неверным выводам и решениям.

Для исключения существующей терминологической неоднозначности и неопределенности в [2-8] были откорректированы и уточнены, основные термины и определения, используемые в классической механике.

**Основные аксиомы и принципы**

Основные положения механики впервые вместе были сформулированы великим английским ученым И. Ньютоном в «Математических началах натуральной

философии» [9]. Отметим, что современные трактовки законов Ньютона многообразны, хотя по смыслу и содержанию совершенно идентичны [10-13].

Анализ оригинальных и современных формулировок аксиом или законов движения И. Ньютона в [2-13] показал, что они:

- сформулированы только для абстрактных материальных объектов - материальной точки и системы материальных точек;
- первая и вторая традиционные аксиомы (законы) механики не являются ни законами, ни аксиомами, так как это следствия из других аксиом;
- второй и третий закон - это законы не о движении материальных тел, а это аксиомы о взаимодействии тел.

Основываясь на современных понятиях и знаниях, сформулируем основные ***аксиомы, принципы*** и ***следствия*** взаимодействий и движений материальных объектов.

- *Вселенная это все то, что существует – весь мир.*
- *Вселенная безгранична и бесконечна.*
- *Вселенная одна.*
- *Вселенная это консервативная система*
- *Вселенная многообразна по составу.*
- *Материя один из компонентов Вселенной.*
- *Материя многообразна по виду и составу.*
- *Материя существует только в движении.*
- *Движение разнообразно.*
- *Материя образует материальные тела.*
- *Материя и материальные тела - хранилища энергии.*
- *Энергия - универсальная мера всех форм движения материи.*
- *Полная энергия Вселенной постоянна.*
- *Энергия не возникает из ничего и не исчезает, она может только переходить из одной формы в другую.*
- *Количество запасенной и запасаемой материальным объектом энергии определяется его составом, движением и массой.*
- *Масса Вселенной постоянна.*
- *Все материальные тела во Вселенной, с момента её возникновения, взаимодействуют между собой.*
- *Во Вселенной нет тел, не взаимодействующих с другими телами.*
- *Взаимодействия (связи), возникающие между телами, могут быть как контактными, так и бесконтактными.*
- *Взаимодействия тел разнообразны и осуществляются посредством различных полей.*
- *Взаимодействия тел равновелики и разнонаправлены.*
- *Взаимодействие тел приводит к изменению их состояния (движению).*
- ***Принцип относительности.*** *Все физические процессы в инерциальных системах отсчета протекают одинаково.*
- ***Принцип суперпозиции.*** *Результирующий эффект от нескольких независимых воздействий; представляет собой сумму эффектов, вызываемых каждым воздействием в отдельности.*
- ***Принцип освобождаемости.*** *Любое взаимодействующее тело можно рассматривать как свободное, если мысленно освободить его от связей, заменив их действие соответствующими реакциями.*

**Следствия из аксиом**

Так как механическая форма движения является наиболее исследованной, поэтому, пока, остановимся только на ней.

Из приведенных аксиом и ранее сделанных выводов [2-6] следует, что, энергия является единой универсальной мерой всех форм движения материи.

Любое механическое движение тела состоит из суммы простейших движений - поступательного и вращательного. Тогда, в общем случае, для тела, совершающего механическое движение, кинетическая энергия может быть определена по формуле:

$$T = T_п + T_в, \quad (1)$$

где: $T$ – кинетическая энергия; $T_п$ – кинетическая энергия поступательного движения; $T_в$ – кинетическая энергия вращательного движения.

Определив последовательно эти энергии и после ряда преобразований, получим уравнение движения такого тела

$$\begin{cases} \dfrac{d\vec{K}_п}{dt} = \vec{F} \\ \dfrac{d\vec{K}_в}{dt} = \vec{M} \end{cases}. \quad (2)$$

В частном случае при $m=const$ и $I=const$, из (2) найдем

$$\begin{cases} m\vec{a} = \vec{F} \\ I\vec{\varepsilon} = \vec{M} \end{cases}. \quad (3)$$

Если в (3) принять, что ускорения $a=0$ и $\varepsilon=0$, то получим уравнения равновесия тела

$$\begin{cases} \vec{F} = 0 \\ \vec{M} = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Формулы (2), (3) и (4) можно объединить и представить, соответственно, в следующем обобщенном виде:

$$\frac{d\vec{K}_j}{dt} = \vec{Q}_j; \quad (5)$$

$$\vec{l}_j = \frac{\vec{Q}_j}{b_j}; \quad (6)$$

$$\sum \vec{Q}_j = 0, \quad (7)$$

где $j=1,2$.

При $j=1$ $\vec{K}_1 = \vec{K}_n$, $b_1=m$, $\vec{l}_1 = \vec{a}$ и $\vec{Q}_1 = \vec{F}$.

При $j=2$ $\vec{K}_2 = \vec{K}_в$, $b_2=I$, $\vec{l}_2 = \vec{\varepsilon}$ и $\vec{Q}_2 = \vec{M}$

.

Формулы (2,…,7) и есть следствие из аксиом 12, 17, … , 21.

Следствия для обобщенных формул (5), (6) и (7) можно сформулировать, соответственно, следующим образом.

*Следствие. Изменение соэнергии тела во времени равно сумме сил и моментов сил, взаимодействующих с ним тел.*

*Следствие. При движении тела его ускорения прямо пропорциональны главным векторам сил и моментов, действующих на него сил и обратно пропорционально мерам инерции.*

*Следствие. Тело, на которое действуют только системы уравновешенных сил и моментов, находится в покое или движется с постоянными линейной и угловой скоростями.*

Обобщенные формулы (5), (6) и (7) и следствия к ним справедливы, при соответствующих упрощениях и для материальной точки.

**Выводы**

В работе рассмотрены, откорректированы и сформулированы основные понятия, терминология, основные новые аксиомы, принципы и следствия движения материальных тел. Справедливость полученных результатов доказана их практическим применением [14].

## Список литературы

1. *Коган И.Ш.* Физические величины и понятия (обобщение и систематизация) URL: http://physicalsystems.org/index.html (Дата обращения: 01.07.14).

2. *Смелягин А.И.* Объекты, для которых сформулированы аксиомы или законы классической механики // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). Научный журнал. 2014. №1. С. 21-25.

3. *Смелягин А.И.* Аксиомы или законы движения сформулировал И. Ньютон // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). Научный журнал. 2014. № 2. С. 11-16.

4. *Смелягин А.И.* Основные, первичные понятия механики // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). Научный журнал. 2014. № 2. С. 17-26.

5. *Смелягин А.И.* Аксиомы движения материальных тел // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). Научный журнал. 2014. №3. С. 19-34.

6. *Смелягин А.И.* Теоремы, принципы и уравнения механики // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). Научный журнал. 2014. №4. С. 21-29.

7. *Смелягин А.И.* Структура механизмов и машин. – М.: Высш. шк., 2006. – 304 с.

8. *Смелягин А.И.* Теория механизмов и машин. Курсовое проектирование. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 263 с.

9. *Ньютон Исаак.* Математические начала натуральной философии.- М.: Наука, 1989. – 688 с.

10. *Голубев Ю. Ф.* Основы теоретической механики. 2-е изд. - М.: Изд-во МГУ, 2000. – 720 с.

11. *Кузьмичев В.Е.* Законы и формулы физики. – Киев: Наук. Думка, 1989. – 864 с.

12. *Никитин Н.Н.* Курс теоретической механики. – М.: Высш. шк., 1990. – 607 с.

13. *Кухлинг Х.* Справочник по физике. - Перевод с нем. – М.: МИР, 1983. – 520 с.

14. *Смелягин А.И.* Применение новых аксиом и следствий из них для исследования движений материальных тел // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). Научный журнал. 2015. №1. С. 19-27.

## THE AXIOMS AND CONSEQUENCES FOR MACHINES DYNAMICS RESEARCH

**Smelyagin A. I**.[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: asmelyagin@yandex.ru

[1]Kuban State Technological University, 2 street Moskovskaya, Krasnodar, 350072, Russian Federation

**Abstract:** Machines consist only of material bodies (parts) and links. Dynamic analysis of machines is carried out either by using Newton's laws or equations derived from these laws. However, since the laws of Newton formulated only for the material point, then apply them to the study of machines improperly. Therefore, there is formulated the basic concepts and terminology used in the study of the motion of material bodies, and formulated the basic principles of the new axioms and motion of material bodies. Derived basic investigation necessary to study the dynamics of machines. Refined and adjusted terminology used in the study of the movement of units in the bonds imposed on it.

**Keywords:** machine, link, material body, kinematic couple, bond, law, an axiom, a principle, a consequence, dynamics of machines

**УДК 621.01**

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ ДАТЧИКОВ НА ГИБКОЙ ПОДЛОЖКЕ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ В ВИДЕ СЕТИ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

*Д.С. ТРУХМАНОВ, магистр техники и технологии, ст. преп.*
*(КузГТУ, г. Кемерово, Россия)*

Трухманов Д.С. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
E-mail: trizart@mail.ru

**Аннотация:** в статье рассмотрены основные характеристики, определяющие качество тензорезистивных датчиков и дано краткое пояснение, почему именно данные характеристики являются определяющими. Проведено сравнение по рассмотренным параметрам экспериментальных исследований датчиков с чувствительными элементами из различных материалов, а также детально разобраны отдельные исследования датчиков на основе УНТ-сетей. В заключение, предложена оригинальная конструкция датчика, позволяющая максимально раскрыть потенциал УНТ-сетей в качестве тензорезистивного материала и сделаны выводы о преимуществах и недостатках данного материала.

**Ключевые слова**: тензометрия, структурный мониторинг состояния, углеродные нанотрубки, тензорезисторы, тензодатчики, УНТ-сети, бакипейпер, углеродная бумага.

На сегодняшний день существует огромное количество методов, для диагностики структурных элементов инфраструктурных сооружений (таких как мосты, здания и трубопроводы), в военной и гражданской авиации, а также в космической технике и изделиях массового пользования (например, в автомобилях). Одни из самых перспективных на сегодняшний день методов, включают в себя применение тензодатчиков с высоким коэффициентом тезочувствительности, достигнутом благодаря применению новых материалов. При этом повышение эксплуатационных требований к подобным датчикам приводит и к повышению требований к материалам.

Термин «напряжение» – используется для измерения деформации объекта, вызванной внешними и внутренними силами. Положительное изменение размеров обозначается, как растягивающие напряжения, а отрицательное – как сжимающие. Примером напряжений может служить даже деформации кожи лица человека, во время улыбки. Кожа растягивается или сжимается из-за деформации структуры лица, приводящей к возникновения растягивающих или сжимающих напряжений. Напряжения существуют во всех объектах, встречающихся в повседневной жизни, но в большинстве случаев, ими пренебрегают. Однако, например, зная уровень напряжений в деталях самолета, можно получить информацию о структурной целостности, которую в дальнейшем можно использовать для проведения профилактики и снижения вероятности возникновения несчастных случаев [1]. Чтобы получить полную информацию о напряжениях, потребуется очень большое количество тензометрических датчиков, что в конечном итоге приводит к высокой потребности в дешевых и простых в изготовлении датчиков.

Одной из главных характеристик тензодатчиков – является относительное изменение сопротивления из-за деформации – т.н. тензочувствительность. Коэффициент тензочувствительности определяется по формуле:

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon},$$

где $R_0$ – начальное сопротивление тензочувствительного элемента, $\Delta R$ – изменение сопротивления, $\varepsilon$ – относительная деформация измеряемого образца.

Более высокие значения КТ говорят о большей величине изменения сопротивления в следствие деформации и наоборот. Отсюда следует, что хороший тензодатчик имеет высокий коэффициент и ключевым фактором для этого является используемый пьезорезистивный материал.

В большинстве случаев, тензодатчики изготавливают из резистивной металлической фольги, имеющей зигзагообразную форму и прикрепленной к изолирующей подложке. Когда подложка деформируется, металлические элементы соответственно сжимаются или растягиваются, что приводит к изменению

атомарной структуры, и, как следствие, – изменению электрического сопротивления. Тензодатчики из металлической фольги, имеют достаточно низкую стоимость. Но они имеют ряд ограничений в использовании, в том числе из-за большой температурной зависимости, низкого сопротивления и низкого коэффициента тензочувствительности (КТ) – от 2 до 5 [2], [3], [4-7]. Невысокое значение данного показателя, а так же ряд других ограничений в использовании металлической фольги привели к необходимости разработки тензодатчиков на основе других пьезорезистивных материалов, таких как кремний и углеродные нанотрубоки.

С помощью тензодатчиков на основе кремниевых материалов, удалось добиться КТ около 200 [7], [8]. В то же время, эксперименты с углеродными нанотрубками (УНТ) показали КТ до 2900 и относительные изменения сопротивления до двух порядков по величине [8], [9]. Так же, в экспериментах был использован графен, который показал КТ приблизительно 300 [10]. Таким образом, УНТ и графен – являются перспективными материалами для разработки новых типов датчиков деформации.

На сегодняшний день, активно обсуждаются два возможных применения тензодатчиков: для биологического мониторинга [3] и в системах структурного мониторинга состояния (SHM-системах, от англ. «Structural Health Monitoring») [9]. Для биологического мониторинга разрабатываются несколько типов тензодатчков. Один из которых можно будет присоединять к поверхности кожи для отслеживания движений суставов, контроля отеков и опухолей, выражения эмоций [3], [11]. Другой тип разрабатывается для мониторинга деформаций костей в рамках послеоперационной терапии [4]. Структурный мониторинг состояния подразумевает формирования сети датчиков для мониторинга структурной целостности в режиме реального времени [13]. Такая система может быть применена для диагностики деталей самолетов, мостов, трубопроводов и других сооружений, где особенно важна структурная целостность [1], [9-12]. Для решения подобных задач требуются простые в изготовлении и недорогие тензодатчики, способные работать в широком диапазоне напряжений.

Дэниель Тэк Инь Ау из Университета Ватрелоо исследовал механические свойства тензометрических датчиков, чувствительным элементом в которых выступал осажденный субстрат из нанотрубок. Для определения модуля упругости был проведен ряд циклических испытаний. На графике (рис. 1), хорошо видно, что повторяемость результатов, выдаваемых такими датчиками в процессе эксплуатации – очень высока на протяжении большого количества циклов нагружения-разгружения. Из графика также видно, что значения, соответствующие первому циклу нагружения датчика, не немного отличаются от последующих циклов. Петля гистерезиса стабилизируется, начиная со второго цикла, а значения выходного сигнала при нагружении и разгружении отличаются незначительно. Модуль упругости был определен, как 0,7 ГПа. [11].

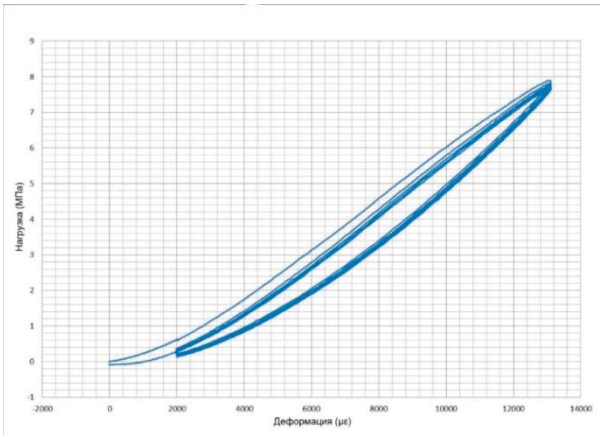



Рисунок 1 – Зависимость нагрузки тензодатчика на основе субстрата из УНТ от деформации.

С. М. Вемуру и Р. Вахи в своей работе по изучению эффективности применения в тензометрии пленок, состоящих их многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) провели ряд испытаний по деформации медного образца, с установленным на нем тензодатчиком. На рисунках 2 и 3 приведены некоторые результаты этих испытаний, из которых хорошо видно высокую чувствительность подобных датчиков, а также хорошую корреляцию результатов данных полученных при нагрузке и разгрузке образца [12].

Несмотря на всю перспективность и высокие показатели электромеханических свойств, размеры как отдельных нанотрубок, так и тонких пленок на их основе – очень малы для применения основанных на них датчиков в реальной жизни. Поэтому по всему миру ведутся исследования свойств материалов, основанных на углеродных наноматериалах, таких как УНТ-сети (сети из углеродных нанотрубок). В настоящее время развиваются разные подходы к изготовлению УНТ-сетей. В одном из самых технологичных способов, УНТ-сеть образуется, когда раствор УНТ, например, в диметилформамиде, пропускают через бумажный фильтр или тефлон, и сушат в вакууме. Такие УНТ-наносети в англоязычной литературе получили название бакипейпер (англ. «buckypaper»).

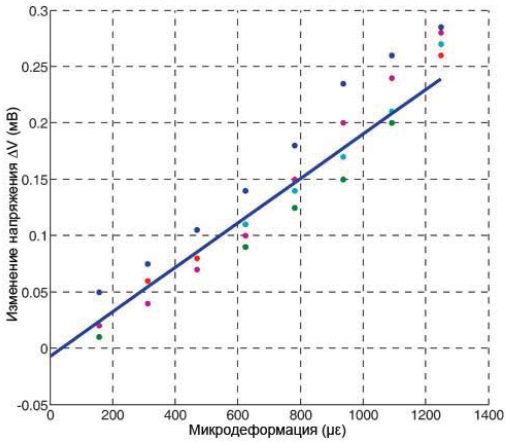



Рисунок 2 – Изменение напряжения в МУНТ-пленке в зависимости от деформации медного образца

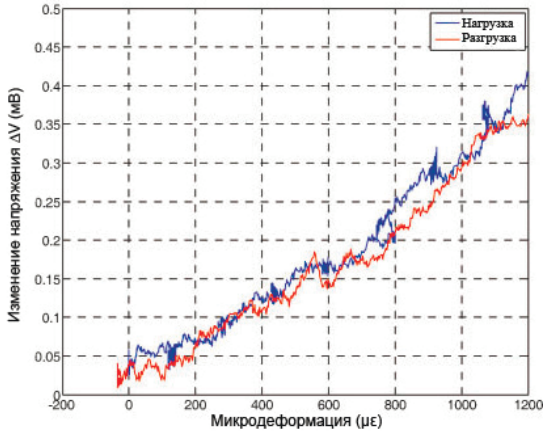



Рисунок 3 – Зависимость изменения напряжения в зависимости от деформации во время нагрузки и разгрузки образца

Однако использование бакипейпер в качестве датчика затрудняется возможным снижением их чувствительности. Это связано с тем, что отдельные нанотрубки в бакипейпер в процессе деформации могут проскальзывать друг относительно друга [14, 15]. Одной из частных проблем при изготовлении бакипейпер является использование для диспергирования нанотрубок в раствор механической ультразвуковой дисперсии или перемешивания. Это может приводить к разрушению отдельных нанотрубок, что нарушает заданную концентрацию раствора и ухудшает электрические свойства полученной бакипейпер [14, 15, 16]. Таким образом, повышение эффективности перспективных датчиков на основе бакипейпер требует исследований стабильности измерений этих датчиков, разработки такого исполнения датчика, которое позволило бы снизить негативное влияние проскальзывания нанотрубок друг относительно друга, а также модернизации технологического процесса их производства.

При разработке конструкции тензодатчика на основе бакипейпер мы столкнулись с рядом трудностей, в первую очередь связанных с проблемой снятий напряжения с поверхности материала.

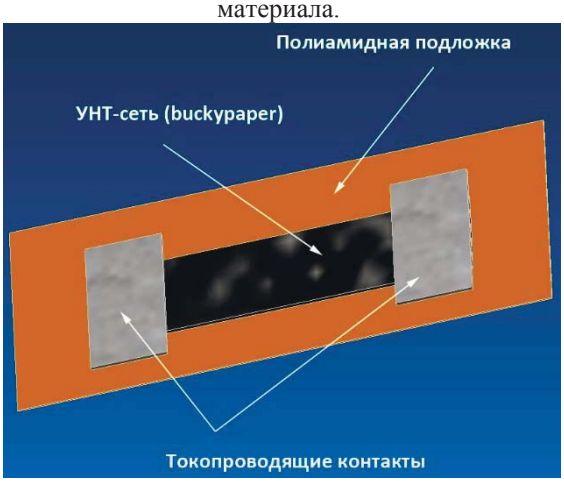



Рисунок 4 – Схематичная конструкция тензорезистивного датчика на основе buckypaper.

При разработке конструкции тензодатчика на основе бакипейпер мы столкнулись с рядом трудностей, в первую очередь связанных с проблемой снятий напряжения с поверхности материала. Текущая конструкция разрабатываемого нами тензодатчика представляет из себя образец бакипейпер, расположенный на изолирующей полиамидной подложке и зафиксированный двумя токопроводящими контактами. Фиксирующие контактные пластины, помимо непосредственно фиксации, позволяют беспрепятственно снимать напряжение с бакипейпер. Вся конструкция фиксируется с помощью эпоксидной смолы. По нашему предположению, дополнительная «пропитка» бакипейпер эпоксидной смолой поможет избежать основного недостатка данного материала, а именно взаимного проскальзывания УНТ относительно друг друга. Такая конструкция позволяет обеспечить высокую прилегаемость датчика к поверхности

исследуемого изделия, а также простоту и низкую стоимость его изготовления.

В заключение, хотелось бы отметить, что повышение эффективности датчиков на основе бакипейпер требует исследований стабильности измерений этих датчиков, а также разработки такого исполнения датчика, которое позволило бы снизить негативные влияния, связанные с особенностью материала и процессами его производства (такими как проскальзывания нанотрубок друг относительно друга) и максимально реализовать потенциал сетей на основе УНТ.

## Список литературы:

1. *Dharap P., Li Z., Nagarajaiah S., Barrera E. V.* Nanotube film based on single-wall carbon nanotubes for strain sensing // Nanotechnology. 2004. Vol. 15, no. 3, pp. 379–382.

2. *Chafy R.R.A., Arafa M.H.,* Esawi A.M.K. Fabrication of Carbon Nanotube // Low Density Polyethylene Composites for Strain Sensing. Key Engineering Materials. 2011. Vol. 495. pp. 33–36.

3. *Lu N., Lu C., Yang S.*. Highly Sensitive Skin-Mountable Strain Gauges Based Entirely on Elastomers / N. Lu, C. Lu, S. Yang, J. Rogers // Advanced Functional Materials. 2012. Vol. 22, no. 19. pp. 4044–4050.

4. *Huang Y.-T., Huang S.-C., Hsu C.-C.* Design and fabrication of single-walled carbon nanonet flexible strain sensors / Y.-T. Huang, S.-C. Huang, C.-C. Hsu, R.-M. Chao, and T. K. Vu // Sensors (Basel, Switzerland). 2012. Vol. 12, no. 3, pp. 3269–80.

5. *Njuguna M. K., Yan C., Hu N.* Sandwiched carbon nanotube film as strain sensor / M. K. Njuguna, C. Yan, N. Hu, J. M. Bell, P. K. D. V. Yarlagadda // Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43, no. 6. pp. 2711–2717.

6. *Su C. C., Liu T., Chang N. K.* Two dimensional carbon nanotube based strain sensor / C. C. Su, T. Liu, N. K. Chang, B. R. Wang, S. H. Chang // Sensors and Actuators A: Physical. 2012. Vol. 176. pp. 124–129.

7. *Stampfer C., Jungen A., Linderman R.* Nano-electromechanical displacement sensing based on single-walled carbon nanotubes / C. Stampfer, A. Jungen, R. Linderman, D. Obergfell, S. Roth, C. Hierold // Nano letters. 2006. Vol. 6, no. 7. pp. 1449–1453.

8. *Zhao J., He C., Yang R.* Ultra-sensitive strain sensors based on piezoresistive nanographene films / J. Zhao, C. He, R. Yang, Z. Shi, M. Cheng, W. Yang, G. Xie, D. Wang, D. Shi, G. Zhang // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 101, no. 6, p. 063112.

9. *Yamada T., Hayamizu Y., Yamamoto Y. A* stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection / T. Yamada, Y. Hayamizu, Y. Yamamoto, Y. Yomogida, A. Izadi-Najafabadi, D. N. Futaba, K. Hata // Nature nanotechnology. 2011. Vol. 6, no. 5, pp. 296–301.

10. *Withey P., Vemuru V.S.M., Bachilo S.M.* Strain paint: noncontact strain measurement using single-walled carbon nanotube composite coatings / P. Withey, V. S. M. Vemuru, S. M. Bachilo, S. Nagarajaiah, R. B. Weisman // Nano letters. 2012. Vol. 12, no. 7. pp. 3497–500.

11. *Azhari F., Banthia N.* Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing // Cement and Concrete Composites. 2012. Vol. 34, no. 7. pp. 866–873.

12. *Vemuru1 S.M., Wahi R., Nagarajaiah S.* Strain sensing using a multiwalled carbon nanotube film / S. M. Vemuru1, R. Wahi, S. Nagarajaiah, P. M. Ajayan // J. Strain Analysis, 2009. Vol. 44, pp. 555–562.

13. *Dawson B.* Vibration condition monitoring techniques for rotating machinery. The Shock and Vibration Digest / B. Dawson. London: SpingerLink, 1976.

14. *Liao K., Li S.* Interfacial characteristics of a carbon nanotube-polystyrene composite system // Applied Physics Letters. 2001. Vol. 79, no. 50. pp. 4225-4227,

15. *Dharap P.* Nanotube film based on single-wall carbon nanotubes for strain sensing / P. Dharap et al. // Nanotechnology. 2004. Vol. 15. pp. 379-382.

16. *Lu K.L.* Mechanical damage of carbon nanotubes by ultrasound / K. L. Lu et al. // Carbon. 1996. Vol. 34, p. 814.

# EXPERIMENTAL RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF STRAIN GAUGE SENSORS ON FLEXIBLE SUBSTRATES WITH SENSITIVE ELEMENTS IN THE FORM OF A NETWORK OF CARBON NANOTUBES

**Trukhmanov D.S.,** M.Sc. (Engineering), e-mail: trizart@mail.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Abstract**:The article describes the main characteristics that define the quality of the strain gauge sensors and a brief explanation of why these characteristics are crucial. Experimental studies sensors with sensing elements made of various materials were compared on the considered parameters, as well as a detailed analysis of some research of sensors based on CNT networks. In conclusion, proposed the original design of the sensor maximizes unlock the potential of CNT networks as piezoresistive material and conclusions about the advantages and disadvantages of this material.

**Keywords:** strain measurement, structural health monitoring, carbon nanotubes, strain gages, strain gauges, CNT network, buckypaper.

**УДК 621.923**

# РАСЧЕТ ВАЛКОВОЙ СИСТЕМЫ СТАНКА ДЛЯ СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ ШАРОВ ПОДШИПНИКОВ

*О.В. ЗАХАРОВ, доктор техн. наук, профессор*
*(СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия)*

Захаров О.В. – 410054, г. Саратов, Политехническая ул., 77,
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
e-mail: zov20@mail.ru

**Аннотация**. Рассмотрен численный метод профилирования валков при обработке сферических поверхностей на бесцентровых суперфинишных станках с продольной подачей. Приведена расчетная схема и математические зависимости.

**Ключевые слова**: суперфинишные станки, шар подшипника, профилирование

Традиционная схема окончательного формообразования шаров в подшипниковой промышленности представляет собой доводку между двумя чугунными дисками с кольцевыми канавками [1]. Обработка осуществляется при больших давлениях в течение нескольких часов. Известны различные технические решения, направленные на совершенствование процесса за счет изменения кинематики движения, конструкции инструмента (дисков), применения новых материалов [2-4], реализованные в серийно изготавливаемых станках или промышленных образцах установок. Данная технология обеспечивает высокую точность формы и низкую шероховатость поверхности, но в результате высоких удельных нагрузок в поверхностных слоях возникает дефектный слой с неблагоприятным распределением остаточных напряжений [5].

Авиационно-космическая отрасль предъявляет повышенные требования, как к техническим характеристикам подшипников, так и к массе узлов. Например, в авиационных подшипниках применяют шарики 20 степени точности и более точные, у которых допуск на диаметр не превышает 1 мкм, сферичность – 0,5 мкм, волнистость – 0,05 мкм, шероховатость – 0,02 мкм. С целью выполнения указанных требований были разработаны шары из керамических и композиционных материалов [6], а также полые тонкостенные шары [7]. Однако традиционная технология обработки в данном случае оказалась малоэффективной.

Попытки решить данную проблему привели к созданию схемы бесцентрового шлифования шаров на станках с продольной подачей [8]. В отличие от известной схемы ведущий круг был выполнен с винтовой канавкой несимметричного профиля, а шлифовальный круг снабжен кольцевыми канавками. Такое решение обеспечило вращение шара от сил трения с ведущим кругом и дополнительное верчение за счет периодического прерывания контакта со шлифовальным кругом. Основное преимущество разработанного метода обработки заключается в высокой производительности процесса. Вместе с тем точечный контакт заготовки со шлифовальным кругом и малое время контакта, лимитируемое длиной кругов, шагом винтовой канавки и частотой вращения ведущего круга, не позволяют достичь малой волнистости и шероховатости поверхности обрабатываемых шаров. Поэтому целесообразным представляется введение последующей финишной обработки абразивными брусками.

Анализ производственного опыта зарубежных производителей и предварительно проведённые исследования показали принципиальную возможность бесцентрового суперфинишированияния сферических поверхностей на станках с продольной подачей. Обработка ведется на серийных станках моделей ВШ-774, SZZ-3 с использованием гладких валков сложной формы наружной поверхности. При установке угла разворота валков в интервале 0,5-1º время обработки составляет от 30 до 90 секунд. Если за счет правильного выбора наладочных параметров станка обеспечивается равномерное вращение шара и его верчение в разных плоскостях, то сетка рисок достаточно равномерно покрывает поверхность. В этом случае гарантируется снижение волнистости и шероховатости поверхности.

Одна из ключевых задач при бесцентровом суперфинишировании сфер заключается в расчете профиля валков. До настоящего времени данная задача не нашла теоретического решения в известной литературе [9]. Поверхность обрабатываемых заготовок представляет собой некоторое приближение к идеальной геометрической поверхности, образованной двумя производящими линиями.

Образующая формируется как огибающая к семейству вспомогательных прямых осцилляции абразивных брусков, а направляющая будет окружностью вращения заготовки на валках. Валковая система станка обеспечивает базирование и подачу заготовок и может рассматриваться как пространственный механизм с перекрещивающимися осями.

Предлагаемый подход к теоретическому описанию процесса формообразования основан на том, что форма заготовки однозначно формируется траекторией ее движения относительно шлифовальных брусков станка. Для профилирования валков использован численный метод решения, так как традиционный метод исследования пространственных зацеплений, построенный на векторно-матричных преобразованиях координат и кинематическом условии огибания поверхностей, не позволяет определить все неизвестные параметры.

Введем в рассмотрение следующие координатные системы (рис. 1): $S_0$ ($X_0$ $0_0$ $Y_0$ $Z_0$) – условно неподвижная система станка; $S_1$ ($X_1$ $0_1$ $Y_1$ $Z_1$) – система заготовки шара; $S_2$ ($X_2$ $0_2$ $Y_2$ $Z_2$) – система левого валка. Система координат $S_2$ по отношению к системе $S_0$ повернута вокруг оси $Y$ по часовой стрелки на угол λ (половина угла перекрещивания осей валков) и смещена по оси $X$ на величину $h$ (наладочное смещение) и по оси $Y$ на величину $-v$ (половина кратчайшего межосевого расстояния валков). Система координат $S_1$ по отношению к системе $S_0$ смещена по оси $Z$ на величину $a$.

Сферическая поверхность заготовки в системе $S_0$ описывается уравнениями:

$$\left.\begin{aligned} X_0 &= -r\sin\beta; \\ Y_0 &= r\cos\alpha\cos\beta; \\ Z_0 &= r\sin\alpha\cos\beta, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где $r$ – радиус сферы; α, β – независимые угловые координаты сферы.

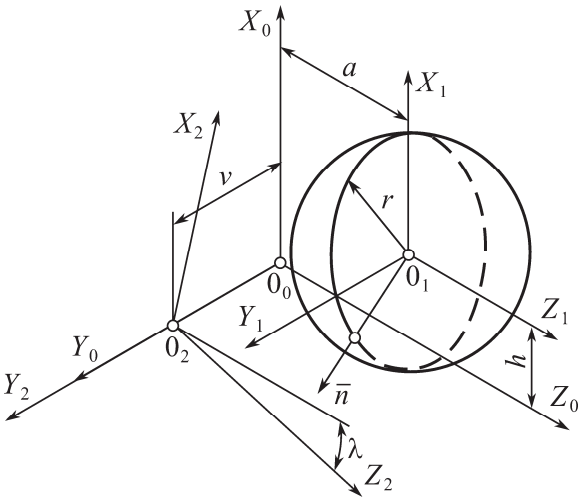



Рисунок 1 - Координатная схема профилирования

Поверхность валка установим как огибающую к траекториям движения точек на поверхности сферы. Для этого необходимо найти точки контакта сферы и валка в каждом текущем положении, заданном координатой $a$. Контактные точки можно определить из условия пересечения нормали к поверхности сферы и оси валка. Затем, задав некоторое сечение валка, и изменяя $a$ вокруг этого сечения, выберем точку на поверхности сферы с минимальным радиусом в системе координат $S_2$. Именно она и будет профилирующей, так как наиболее близко расположена к оси валка.

Выполнив последовательно преобразования уравнений (1) из системы $S_1$ в $S_0$, а затем в $S_2$, получим выражения для семейства поверхностей сферы в относительном движении:

$$\left.\begin{aligned} X_2 &= A\cos\lambda - B\sin\lambda; \\ Y_2 &= r\cos\alpha\cos\beta - v; \\ Z_2 &= A\sin\lambda + B\cos\lambda, \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

где $A = h - r\sin\beta$; $B = r\sin\alpha\cos\beta + a$, $a$ – смещение сферы вдоль валков относительно проекции точки перекрещивания их осей.

Условие пересечения нормалей к поверхности сферы с осью валка, составленное в системе $S_0$, имеет вид:

$$\begin{vmatrix} h - r\sin\beta & r\cos\alpha\cos\beta - v & r\sin\alpha\cos\beta + a \\ -\sin\beta & \cos\alpha\cos\beta & \sin\alpha\cos\beta \\ \sin\lambda & 0 & \cos\lambda \end{vmatrix} = 0 \cdot \qquad (3)$$

Из выражения (3) установим связь между угловыми координатами α и β:

$$tg\beta = \cos\alpha(h - a\,\mathrm{tg}\lambda)/v - \sin\alpha\,\mathrm{tg}\lambda. \qquad (4)$$

Таким образом, окончательно поверхность валка описана уравнениями (1), (2), (4). Профиль валка как тела вращения целесообразно задавать координатами ($Z_2$, $R_2$), где $R_2 = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}$. Однако в этом случае число неизвестных параметров превышает число составленных уравнений, поэтому требуется численный метод решения. Алгоритм численного профилирования валков состоит в следующем. Задается сечение валка $Z_2 = const$, и из последнего уравнения системы (2) после подстановки в него выражения (4) находится точка сферы, нормаль в которой пересекает ось валка при некотором фиксированном значении $a$. Определяются координаты ($Z_2$, $R_2$). Изменяя значения параметра $a$ в некотором интервале вокруг сечения $Z_2 = const$, получаем набор точек контакта сферы и валка в их относительном движении. Профилирующей будет та из них, которая имеет наименьший радиус $R_2$.

Расчеты показали, что левый и правый валки имеют одинаковый профиль, но так как развернуты в противоположных направлениях,

то симметричны относительно плоскости $Z_2 = 0$. Поверхность валков имеет форму, близкую к поверхности однополостного гиперболоида вращения с несколько меньшей кривизной. В зависимости от принятых наладочных параметров меняется кривизна профиля валка.

Таким образом, обоснована возможность формообразования сферических поверхностей на бесцентровых суперфинишных станках с продольной подачей. Рассмотренный численный метод позволяет определить профиль валков с достаточной для практики точностью. Данная задача представляет собой неотъемлемую часть в технологической подготовке производства шаров подшипников.

## Список литературы:

1. *Олендер Л. А.* Технология и оборудование шарикового производства / Л. А. Олендер. Минск: Вышэйшая школа, 1974. 334 с.

2. *Ящерицын П. И.* О механизме формообразования шариков при их доводке / П. И. Ящерицын // Подшипниковая промышленность. 1977. Вып. 4. С. 18-27.

3. *Бухаркин Л. Н.* Доводка крупных шариков повышенной точности / Л. Н. Бухаркин, Т. И. Иногамов // Известия вузов. Машиностроение. 1972. № I. С. 172-177.

4. *Клебанов М. К.* Новый метод доводки шариков подшипников / М. К. Клебанов, А. Ф. Малахов, Л. А. Шабанов // Станки и инструмент. 1975. № 10. С. 28-29.

5. *Куранов В. Г.* Явление «трибоцементации» в процессе финишной обработки шаров подшипников / В. Г. Куранов, А. Н. Виноградов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2007. № 8. С. 32-38.

6. Керамические тела качения перспективных шарикоподшипников: материал, технология изготовления и механическая обработка, расчеты и испытания / Т. Д. Каримбаев, М. А. Мезенцев, А. И. Алферов, С. К. Гордеев // Композиты и наноструктуры. 2010. № 2. С. 12-27.

7. *Васин А. Н.* Получение заготовок полых тел качения / А. Н. Васин, П. Ю. Бочкарев // Технология машиностроения. 2004. № 4. С. 3-6.

8. *Васин А. Н.* Повышение эффективности исправления погрешностей формы при бесцентровом шлифовании шариков / А. Н. Васин, Б. М. Изнаиров, А. П. Бочкарев. // СТИН. 2013. № 3. С. 17-19.

9. *Мазальский В. Н.* Суперфинишные станки / В. Н. Мазальский. Л.: Машиностроение, 1988. 127 с.

# CALCULATION ROLL SYSTEM OF MACHINE TOLLS FOR SUPERFINISHING OF BALL BEARINGS

**Zakharov O.V.,** D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: zov20@mail.ru

O.V. Zakharov Yuri Gagarin State Technical University, 77 Politecknicheskaya str., Saratov, 410054, Russian Federation

**Abstract**. The numerical method of profiling rolls at the processing of spherical surfaces on the center-less superfinishing machines with traverse. Calculated scheme and mathematical relationships are given.

**Keywords**: superfinishing machines, ball of bearing, profiling.

**УДК 622.232.83.054.52**

# СИБИРСКАЯ ШКОЛА МАШИНОВЕДЕНИЯ И ЕЁ ВКЛАД В РАЗВИТИЕ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*М. В. КУРЛЕНЯ, доктор техн. наук, профессор, академик РАН,*
*Б. Н. СМОЛЯНИЦКИЙ, доктор техн. наук, профессор*

(ИГД СО РАН, 630091, г. Новосибирск, Россия, Красный проспект, 54)

**Аннотация**: Приведены результаты работы научной школы машиноведения ИГД СО РАН по созданию горных машин и оборудования и их внедрению на рудниках и шахтах Кузбасса, а также на машиностроительных предприятиях страны. Представлены наиболее значимые достижения в этом направлении, связанные с разработкой машин и оборудования для бурения скважин различного назначения и разрушения породного массива при безвзрывной технологии добычи полезных ископаемых, отмечены новые возможности вибрационной техники на примере создания отвалообразователей для повышения безопасности горных работ за счет удаления места разгрузки автосамосвала от кромки откоса отвального яруса, даны сведения о новых типах крепей и вентиляторах главного проветривания. Показаны направления исследований по созданию погружных пневмоударников с повышенной энергией удара иувеличению прочности и надежности их основных узлов и деталей.

**Ключевые слова:** бурение, разрушение, породный массив, энергия удара, активный ковш, крепь, отвалообразователь, вентилятор.

Горное и строительное машиноведение – это традиционное направление в горных институтах РАН по разработке и созданию новых машин и оборудования для горнодобывающего и строительного комплекса страны. В Сибирском отделении РАН оно было сформировано в Институте горного дела известными учеными – горняками Н.А.Чинакалом, Б.В. Суднишниковым, Г.В. Родионовым, В.М. Владимировым, А.Д. Костылевым, А.И.Федуловым и др. в 50…60-е годы прошлого столетия.

Наиболее значимые достижения в этом направлении связаны с разработкой машин и оборудования для бурения скважин различного назначения, созданием, простых по конструкции и надежных вибрационных устройств для интенсификации выпуска из емкостей руды и других материалов (цемент, песок и др.), созданием ручного вибробезопасного пневматического и электрического инструмента, разработкой вентиляторов для проветривания горных выработок и транспортных тоннелей. Они стали возможными вследствие широкого взгляда основателей направления и их учеников на проблемы машиноведения в целом. Благодаря этому полученные научные результаты находили применение и в смежных отраслях производства. Тому пример пневмопробойники, пневмомолоты вибробезопасные трамбовки, пневмобуры и многое другое.

Эффективная реализация новых технологий невозможна без новых технических средств. Одно из основополагающих достижений ИГД СО РАН – разработка и внедрение на предприятиях Горной Шории системы непрерывного этажно-принудительного обрушения с вибровыпуском руды, связанное с именем проф., д.т.н. Н.Г.Дубынина. С ее внедрением производительность труда выросла на отдельных операциях в 20 раз, а в целом по рудникам – в 2 раза. Но эта технология была бы нереализованной без создания комплекса буровой техники для высокопроизводительного бурения глубоких взрывных скважин и вибрационных машин. Имеются в виду буровой полуавтомат НКР-100 и гамма погружных пневмоударников, созданных в содружестве с Криворожским заводом «Коммунист» и отмеченные в своё время Ленинской премией, а также вибрационная машина «Сибирячка» для выпуска руды из блоков, производство которой было организовано на Магнитогорском заводе горного машиностроения.

Сформированные и действующие в настоящее время в ИГД коллективы и направления проводимых ими исследований в области горного и строительного машиноведения обеспечили научное обобщение цикла фундаментальных исследований и инновационных разработок, основанных на глубоком знании физических основ взаимодействия с породными массивами рабочих органов машин для разведки, добычи и переработки полезных ископаемых, а также подземного строительства. Это имеет принципиальное значение для выработки рекомендаций по обоснованию принципиальных схем новых машин, конструированию их рабочих органов, основных узлов и деталей и, несомненно, способствует повышению их ресурса, эффективности применения и производительности при ограничениях на потребление энергоносителя.

Создание принципиально нового бурового оборудования, которое до сих пор является основным на железорудных предприятиях России, позволяя выполнять годовой объем взрывных скважин только по одному блоку на рудниках Горной Шории и Хакассии, равный 20 – 30 тыс. пог. м. стало возможным благодаря высокому уровню развития теории машин ударного действия, наличие коллектива высококлассных специалистов.

Научной основой для разработок новых пневматических ударных машин явились труды Лауреата Ленинской премии, доктора технических наук, профессора Б.В.Суднишникова и его учеников. Теорема Б.В. Суднишникова [1] была своего рода революционным достижением, обеспечившим исследователей методом анализа рабочих циклов пневмоударных машин на стадии их разработки и количественной оценке их параметров при экспериментальных исследованиях.

Этот метод основывался на диаграммах рабочего цикла пневмоударных машин, которые проще всего представить или экспериментально получить в координатах давление воздуха (сила) – время. Теорема гласит: перемещение массы $m$ в направлении какой-либо оси за определенный промежуток времени равно статическому моменту площади импульса, образованного проекцией силы на эту ось относительно прямой $t = \tau$, деленному на массу $m$, плюс проекция начальной скорости массы, умноженная на время $\tau$.

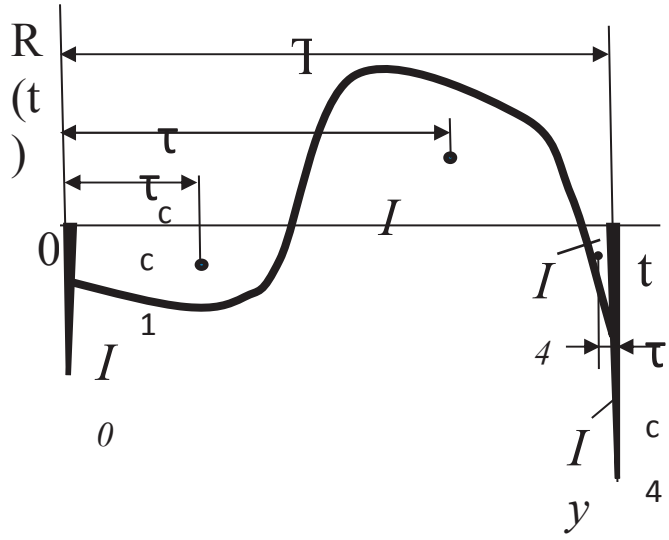



Рисунок1 - Диаграмма результирующей силы, действующей на ударник пневмоударной машины в течение рабочего цикла

На рис. 1 представлена типичная диаграмма результирующей силы, действующей на ударник пневмоударной машины в течение рабочего цикла, дополненная импульсами удара $I_y$ и отскока $I_o$, действующих на ударник в момент удара по инструменту. В этом случае сумма статических моментов площадей импульсов относительно оси ординат будет равна нулю, так как по истечении времени $T$ ударник возвращается в прежнее положение. Это свойство использовано для определения ударного импульса

$$I_y = \frac{I\tau - I_1 \tau_{c1} - I_4(\tau - \tau_{c4})}{T},$$

зная величину которого можно вычислить скорость удара $V_y$ и энергию удара $A$

$$V_y = {}^{I_y}/_{m}; \quad A = \frac{I_y^2}{2m},$$

где $m$ - масса ударника.

Даже этот простой пример показывает возможности теоремы Б.В. Суднишникова. Он наглядно демонстрирует, как влияют параметры рабочего цикла на выходные показатели машины и каким образом их нужно задавать или изменять на стадии проектирования, чтобы получить требуемый результат. В эпоху, когда не было ЭВМ, это достижение явилось поистине революционным, обеспечившим создание целой гаммы новых – опередивших свое время машин ударного действия.

В настоящее время в связи с ростом глубины разработки месторождений полезных ископаемых бурение осуществляют в условиях возросшего горного давления и высокой сейсмоактивности. Эти факторы вызывают интенсивные деформации массива, а от 20 до 50 % пробуренных скважин в подготавливаемом блоке разрушаются [2], что влечет дополнительные затраты на бурение новых скважин взамен пришедших в негодность и приводит к ухудшению качества дробления горной массы. Поэтому возникла потребность в увеличении диаметра скважин до 130 мм вместо прежних 110 мм и создании по-

гружных пневмоударников, способных с высокой производительностью эти скважины бурить, но при сниженном динамическом воздействии на станок. В этом случае ожидаемое сокращение времени на бурение составляет по расчетам специалистов ИГД СО РАН около 30 % [3]. Однако пневмоударник для выполнения такой работы должен иметь увеличенную, по меньшей мере, в 1.5 раза энергию удара, приходящуюся на единицу площади забоя, по сравнению с применяемыми в настоящее время [4]. Об этом свидетельствуют результаты проведенных в ИГД СО РАН исследований, которые впервые показали, что существует пороговое значение энергии удара, обеспечивающее объемное разрушение массива с минимальной энергоемкостью, и критерий ее достижения [5].

Для повышения производительности процесса разрушения одновременно с энергией необходимо увеличение частоты ударов, что еще больше усложнило задачу в условиях российских рудников, давление сжатого воздуха в магистрали которых не превышает 0.5 МПа. Её решение потребовало обоснования и применения в погружных ударных машинах энергонасыщенных рабочих циклов, которые не были до этого реализованы в полной мере ни в России, ни за рубежом.

Ученые ИГД СО РАН доказали принципиальную возможность увеличения в 2 раза энергии удара пневмоударных машин по сравнению с аналогами, при одинаковых расходе и давлении сжатого воздуха за счет создания новой системы воздухораспределения с клапаном, обеспечивающим снятие противодавления в рабочих камерах при движении ударника.

Упругие клапаны в виде кольца круглого или прямоугольного сечения из эластомера (резина, полиуретан и т.п.) впервые предложены в качестве элемента системы воздухораспределения для погружных пневмоударников сотрудником ИГД СО АН СССР В.А. Гауном [6]. Их применение позволило в 2 раза увеличить энергию удара и на 30 % повысить ударную мощность без изменения диаметра машины и расхода сжатого воздуха. Такой же эффект получил А.А. Липин, но с более простым возвратно-поступательно перемещающимся питающе-разрядным клапаном [4]. Погружные пневмоударники на основе этих воздухораспределительных систем были созданы, прошли испытания в производственных условиях и предложены для серийного производства.

Для бурения дегазационных и технологических скважин диаметром 76 и 93 мм совместно с ООО «Спецгидравлика» (г. Новосибирск) созданы и в условиях шахтоучастка «Октябрьский» ООО «Угольная компания Заречная» испытаны буровые станки СБР – 400, в ходе которых пробурено более 50 км скважин и установлено, что средняя скорость вращательного бурения по углю составила 1,5 м/мин., что выше на 30%, чем у отечественных аналогов и не уступает зарубежным. Оснащение станка разработанными в ИГД СО РАН специализированными погружными пневмоударниками позволяет бурить скважины в породах крепостью свыше 8 единиц по шкале проф. М.М. Протодьяконова [7, 8] со скоростями в 2 – 3 раза превышают скорости вращательного бурения.

Бурение взрывных скважин погружными пневмоударниками на открытых горных работах успешно развивается во все увеличивающихся объемах за счет использования буровых станков в комплекте с погружными пневмоударниками высокого (до 3.5 МПа) давления. В России эти работы осуществляются зарубежной техникой, например, буровыми станками типа ROC — L6, L7, L8 всемирно известной фирмы Atlas Copco. Переход на повышенное (до 3.5 МПа) давление энергоносителя, обеспечивая высокие энергетические параметры машины, приводит к росту напряжений в соударяющихся деталях, повышая требования к прочности и долговечности элементов машин. Поэтому актуальны обоснование критериев подбора материалов для изготовления деталей пневмоударников и разработка эффективных технологий упрочнения.

В НГТУ разработан и совместно с отделом «Горного машиноведения и бурения» ИГД СО РАН (рук. А.А. Репин) проверен на высоконагруженных деталях пневмоударников метод комбинированной термической обработки, обеспечивающий повышение показателей конструктивной прочности сталей путем создания в них смешанных мартенсито-ферритных, мартенсито-перлитных и феррито-бейнитных структур [9].

Особенность метода термического упрочнения деталей ударных машин заключается в том, что в стали формируется смешанная мартенсито-бейнитная структура. Мартенситные кристаллы окружены аустенитом, обеспечивающим релаксацию внутренних напряжений, в результате чего образующийся мартенсит становится менее напряженным и хрупким, что позволяет обеспечить высокий уровень прочности и трещиностойкости стали. Формирование смешанной структуры происходит при нагреве обрабатываемой детали до температуры появления аустенита, охлаждении в расплаве селитры до температуры, находящейся в диапазоне начала и окончания мартенситного превращения, и последующем нагреве до интервала бейнитного превращения. Время выдержки в каждом режиме должно быть достаточным, чтобы произошло выравнивание температуры в объеме детали.

Эксперименты показали, что создание структуры подобного типа позволяет в 1.5 раза повысить ударную вязкость и в 2 раза повысить трещиностойкость высокопрочной стали по срав-

нению с традиционными видами термической обработки. Результаты исследований использованы для изготовления деталей пневмоударника ПВ 170М, который широко проверен в производственных условиях при бурении взрывных скважин на открытых горных работах. В ходе испытаний проведено сравнение с пневмоударником шведской конструкции SD6 (Швеция), показавшее, что скорости бурения сопоставимы, а в ряде случаев скорость бурения пневмоударником ПВ 170М превышает скорость импортного.

Еще одним примером высокого уровня работ в области машин ударного действия является создание под руководством А.Р. Маттиса в 90-х годах прошлого столетия совместно с Уралмашем первого в мировой практике карьерного экскаватора с ковшом активного действия – ЭКГ-5В [10]для реализации безвзрывной технологии добычи полезных ископаемых и освоено его промышленное производство. Была обоснована высокая технико-экономическая эффективность применения новой техники и безвзрывной технологии и область наиболее рационального их применения. Результаты этих исследований полностью подтвердились при эксплуатации на ряде карьеров, в том числе и угольных разрезах выпущенных Уралмашем первых шести экскаваторов. На основе полученного опыта начаты работы по созданию более мощного экскаватора с ковшом активного действия ЭКГ-12В.

С целью ускорения внедрения таких машин на горнодобывающих предприятиях в настоящее время обоснована возможность реконструкции широко распространенных на карьерах экскаваторов ЭКГ-5А и оснащение их ковшами активного действия. Как показывают расчеты, такая реконструкция обойдется предприятиям в 3-4 раза дешевле приобретения новых экскаваторов ЭКГ-5В.

Доказано, что переход на безвзрывные технологии там, где это позволяют горно-технические условия, обеспечивает упрощение организации работ в забое, сокращение потерь и разубоживания полезного ископаемого, снижение техногенной нагрузки на окружающую среду и, в конечном итоге, получение значительного экономического эффекта.

Исследованиями, проведенными ИГД СО РАН, ИГДС СО РАН и ИГД УрО РАН установлено, что в настоящее время по безвзрывной технологии целесообразно разрабатывать 300-350 млн. куб. м полезных ископаемых и вскрышных пород ежегодно [11].

Для отработки мощных пологих пластов, взамен традиционного разделения их на слои, на основе исследований закономерностей процессов разрушения угля и его выпуска, в ИГД СО РАН под руководством чл.-корр. РАН В.И. Клишина разработан новый тип крепи с регулируемым дозированным выпуском угля, позволяющим создать общий поток угля над механизированным комплексом [12]. Управляемый одновременный дозированный выпуск угля на забойный конвейер обеспечивается за счет создания люков-бункеров в оградительной части крепи, и установки питателей в завальной части. Комплекс позволяет создать безопасное рабочее пространство и непрерывный процесс отбойки, выпуска и транспортировки угля, максимальную полноту выемки угля и снижения его разубоживания. Применение крепей нового типа решает проблему отработки мощных пологопадающих угольных пластов.

Среди важнейших результатов в области горного машиностроения следует отметить и разработки Института по тоннельной вентиляции шахт и метрополитенов [13, 14]. Созданы вентиляторы главного проветривания, которые дают возможность в широких пределах регулировать расход воздуха в зависимости от реальной потребности в течение суток и за счет этого значительно снизить расход электроэнергии на проветривание. Вентиляторы ВО-24К с поворотными на ходу лопатками рабочего колеса установлены и успешно эксплуатируются на шахтах «Костромовская» и «Романовская-1» (г. Ленинск-Кузнецкий).

Для безопасной и высокоэффективной работы автосамосвалов грузоподъемностью до 300 т при формировании отвалов на слабом основании из пород низкой прочности разработан самоходный гидрофицированный вибрационный отвалообразователь. Использование отвалообразователя на карьерах позволяет повысить безопасность горных работ за счет удаления места разгрузки автосамосвала от кромки откоса отвального яруса, снизить стоимость отвальных работ за счет сокращения парка бульдозеров, уменьшить количество отвальных ярусов и увеличить высоту каждого из них, сократить длину автомобильных дорог.

Перечисленные работы далеко не исчерпывают достижения научной школы машиноведения Института. Они являются всего лишь иллюстрацией того, что полученные результаты научных исследований находят широкое применение на многих горнодобывающих предприятиях. Созданные технологии, машины, приборы позволили существенно повысить производительность труда и эффективность работы этой важнейшей для нашей страны отрасли промышленности, улучшить условия труда горняков.

## Список литературы


1. *Судницников Б.В.* Некоторые вопросы теории машин ударного действия. Новосибирск. ГГИ ЗСФАН, 1949. С. 63.
2. *Репин А.А., Смоляницкий Б.Н., Алексеев С.А., Тимонин В.В., Карпов В.Н., Попелюх А.И.* **О**пыт создания в ИГД СО РАН погружных пневмоударников высокого давления для открытых горных работ // ФТПРПИ. – № 5. – 2014. С. 157-168.
3. *Репин А. А., Алексеев С. Е.* Направления развития погружных пневмоударников // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды (научно-технический журнал). Т. II. Машиноведение. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
4. *Липин А. А.* Перспективные пневмоударники для бурения скважин // ФТПРПИ. – № 2. – 2005. С. 74-79
5. *Тимонин В. В.* Оценка процесса разрушения горных пород при динамическом вдавливании группы инденторов с точки зрения нелинейной геомеханики // Тр. науч. конф. “Геодинамика и напряженное состояние недр Земли”. — Новосибирск, 2008.
6. А.с. № 848615, МПК Е21С3/24 Пневматический ударный механизм. В.А. Гаун.; заявитель Институт горного дела СО РАН. – № 2545603; заявл. 10.11.1971; опубл. 25.07.1981, Бюл. № 27.
7. *Клишин В.И., Кокоулин Д.И., Кубанычбек Б., Гуртенко А.П.* Станок для бурения разведочных, дегазационных и технических скважин СБР-400 // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – № 4. – 2010. С. 50 – 55.
8. *Репин А.А., Алексеев С.Е.* Создание средств проходки прямолинейно направленных скважин // Сборник научных статей. Международная научно-практическая конференция «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» – Новокузнецк. – 2011. С.64-68.
9. *А.И. Попелюх, А.М.Теплых, Д.С. Терентьев, А.Ю. Огнев.* Повышение конструктивной прочности деталей ударных машин термической обработкой созданием в стали смешанной структуры. // Обработка металлов. – №2. – 2009. С. 19-24.
10. *Маттис А.Р.,Зайцев Г.Д.* Проблемы создания экскаваторов для безвзрывной технологии и пути их решения// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – № 5. – 2003. С. 132-135.
11. *Маттис А.Р.* и др. Безвзрывные технологии открытой добычи твердых полезных ископаемых// Новосибирск. Изд-во СО РАН, 2007. С. 336
12. *В. И. Клишин* и др. Разработка мощных пластов механизированными крепями с регулируемым выпуском угля//Новосибирск, Наука, 2007. С. 134.
13. *Попов Н.А., Петров Н.Н.* Новые главные вентиляторные установки с реверсивными и регулируемыми на ходу осевыми вентиляторами для шахт и рудников //Горное оборудование и электромеханика. – № 2. – 2001. С. 28-34.
14. *Петров Н.Н., Попов Н.А.* Пути повышения экономичности и надежности проветривания рудников//Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – № 5. – 2004. С. 121-127.


## SIBERIAN SCHOOL OF MACHINE SCIENCE AND ITS CONTRIBUTION TO THE ADVANCEMENT IN MINING INDUSTRY


**M.V. Kurlenya** Dr Eng, Prof,
Academician of the Russian Academy of Sciences, e-mail:admin@misd.nsc.ru
**B.N. Smolyanitsky** Dr Eng, Prof, email:bsmol@misd.nsc.ru
Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia



**Abstract:** The article gives a report of activities of the machine science school created at the Chinakal Institute of Mining, SB RAS towards engineering of mining machinery to be manufactured and operated in mines in Kuzbass. The authors describe the most significant achievements associated with the development of machines and facilities for various purpose drilling and rock destruction in blast-free mineral mining, highlight new capacities of vibrating machinery in terms of stackers designed for enhancement of safety of dumping by means of moving the dump truck unloading site away from the edge of the dump slope and inform on new types of supports and main ventilation fans. The lines of further research aimed at engineering of downhole pneumatic percussive drilling machines with the higher blow energy and with the enhanced strength and reliability of basic elements are identified.



**Key words:** drilling, destruction, rock mass, blow energy, active-action bucket, support, stacker, fan.

**УДК 622.232.83.054.52**

# НАГРУЖЕННОСТЬ ДИСКОВОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ РАЗРУШЕНИИ МЕЖКОРОНЧАТОГО ЦЕЛИКА СТРЕЛОЙ ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА

*Л. Е. МАМЕТЬЕВ, доктор техн. наук, профессор,*
*А. А. ХОРЕШОК, доктор техн. наук, профессор, директор Горного института,*
*А.Ю. БОРИСОВ, ст. преподаватель*

650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
e-mail: bau.asp@rambler.ru

**Аннотация:** Представлены результаты моделирования напряженного состояния в сопрягаемых конструктивных элементах узлов крепления дисковых инструментов различного конструктивного исполнения на четырехгранных призмах исполнительных органов проходческих комбайнов избирательного действия при разрушении забойных массивов. Рекомендованы схемы размещения и набора четырехгранных призм с дисковым инструментом на корпусе раздаточного редуктора телескопической стрелы в пространстве между двумя резцовыми аксиальными коронками. Сформулированы требования к параметрам шага разрушения и вписываемости контура траектории движения и вылета дисков относительно цилиндрической поверхности корпуса редуктора для предотвращения образования породных целиков в межкорончатом пространстве.

**Ключевые слова:** проходческий комбайн, исполнительный орган, коронка, четырехгранная призма, узел крепления, дисковый инструмент, забойный массив, разрушение, напряженное состояние.

## 1. Введение

Мировой опыт показал, что при проходке горных выработок проходческими комбайнами избирательного действия применяют механический способ разрушения забойного массива резцовым инструментом различной конструкции. Уровень комбайновой проходки в России составляет 89% общего объема проведенных выработок [1].

Огромный парк проходческих комбайнов избирательного действия включает в себя исполнительные органы как с радиальными, так и с аксиальными коронками [2]. При этом каждый тип исполнительных органов проходческих комбайнов избирательного действия имеет в процессе эксплуатации определенные достоинства и недостатки, как технологического, так и технического характера. В процессе эксплуатации проходческих комбайнов с аксиальными коронками единственным способом зарубки является секторный поворот в горизонтальной плоскости с постепенной телескопической раздвижностью стрелы при разрушении забоя до требуемой ширины захвата только одной коронкой [3]. Когда перемещаются аксиальные коронки в вертикальной плоскости для выемки новой полосы, то в межкорончатом пространстве исполнительного органа образуются целики горного массива, в которые упирается корпус раздаточного редуктора. Что заставляет производить непрерывные поперечные качательно-поворотные движения при зарубке, приводящие к увеличению продолжительности цикла, износу и потере резцового инструмента [4, 5, 6].

## 2. Методика исследований

В Горном институте КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева на кафедре горных машин и комплексов проведены комплексные исследования по расширению области применения дискового инструмента для разрушения неоднородных забойных массивов исполнительными органами проходческих комбайнов избирательного действия [7–15]. В ходе исследований разработаны технические решения в виде патентов РФ: 2455486, 128898, 134586, 136086, 138704, 141339, 146845, 149617, 152701. Разрушения целиков (рис. 1) в межкорончатом пространстве исполнительных органов проходческих комбайнов предложено осуществлять по патентам РФ: 136086, 146845, которые повышают эффективность процессов зарубки. Это осуществляется путем размещения четырехгранных призм с дисковыми инструментами на корпусе раздаточного редуктора в межкорончатом пространстве исполнительного органа.

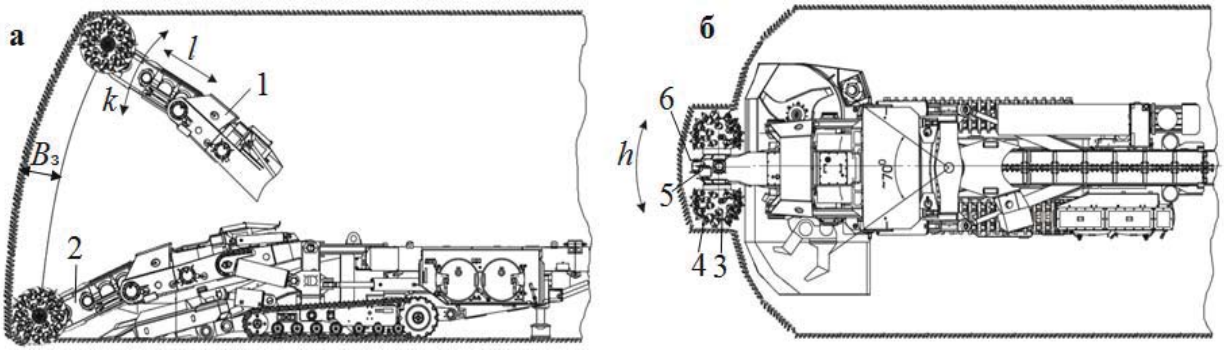



Рисунок 1 - Проходческий комбайн избирательного действия в работе:
а – вид сбоку при зарубке; б – вид сверху после зарубки

В процессе зарубки (рис. 1) [6, 13] стрела 1 исполнительного органа с раздаточным редуктором 2, аксиальными коронками 3, резцами 4, четырехгранными призмами 5 с дисковыми инструментами 6 совершают вертикально-поворотные строгальные движения с одновременной телескопической раздвижностью на забой. При этом целик, который образуется при работе типовых исполнительных органов-аналогов, разрушается в межкорончатом пространстве дисковыми инструментами 6 на четырехгранных призмах 5. Часть корпуса раздаточного редуктора 2 обращена к поверхности забоя и выполнена в виде сектора цилиндра на наружной поверхности которого установлены в шахматном порядке четырехгранные призмы 5 с дисковыми инструментами 6, вписываясь в пространство разрыва между линиями резания, образованными крайними резцами 4 со стороны больших оснований аксиальных коронок 3. Следует отметить, что радиальный вылет кромок дискового инструмента 6 не превышает радиальный вылет крайних резцов 4 на больших основаниях аксиальных коронок 3. Что позволяет эффективно зарубаться на ширину захвата $B$з при движении стрелы 1 во время зарубки в вертикальной плоскости по стрелке $k$ с телескопической раздвижностью по стрелке $l$ (рис. 1, а). При ступенчатой обработке забоя резцовыми аксиальными коронками 3 осуществляется поворотное движение стрелы 1 по стрелке $h$ (рис. 1, б) в горизонтальной плоскости к правому или левому бортам выработки.

Четырехгранные призмы 1 (по патенту РФ 136086) жестко прикреплены к корпусу раздаточного редуктора в межкорончатом пространстве и каждая из них содержит по два узла крепления дискового инструмента 2 (рис. 2) [6, 14].

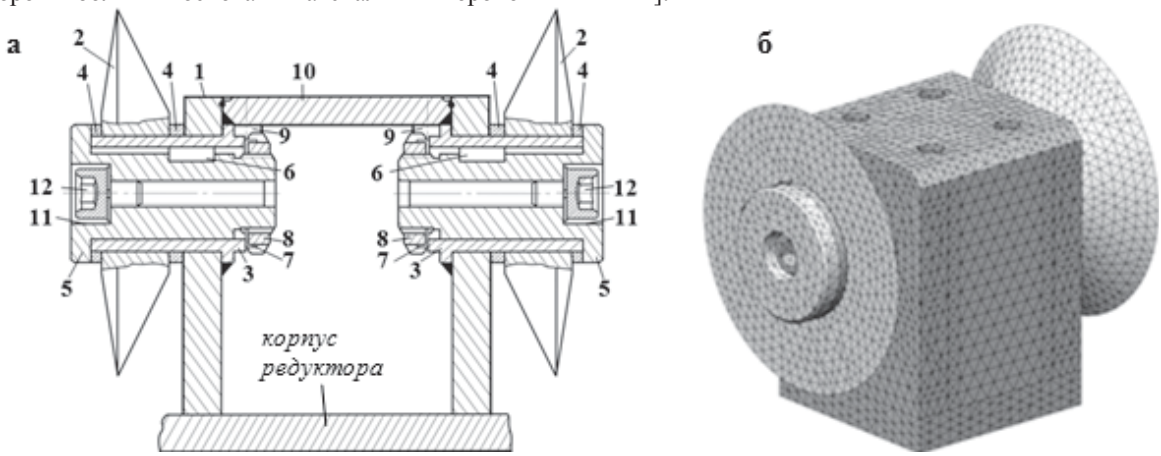



Рисунок 2 - Четырехгранная призма с дисковыми инструментами:
а – раздельные узлы крепления двух дисков; б – конечно-элементная модель

Дисковые инструменты 2 размещены на цапфах-втулках 3, приваренных к внутренним поверхностям граней-стоек четырехгранной призмы 1. Положение дискового инструмента 2 в осевом направлении зафиксировано дистанционными торцевыми шайбами 4 на осях 5 с упорными буртиками. Наружные цилиндрические поверхности осей 5 через шпонки-фиксаторы 6 сопряжены с внутренними поверхностями цапф-втулок 3. Оси 5 через резьбовые хвостовики жестко прикреплены стопорными многолапчатыми шайбами 7 и круглыми шлицевыми гайками 8 к внутренним торцевым поверхностям цапф-втулок 3, обеспечивая свободное вращение дисковым инструментам 2 и торцевым шайбам 4. Во внутреннем пространстве четырехгранной призмы 1 к боковым стенкам приварены бонки 9 с резьбовыми гнездами для крепле-

ния четырехгранной крышки 10. Сквозные внутренние резьбовые отверстия в осях 5 закрыты винтами 12, головки которых размещены в цилиндрических углублениях 11 со стороны внешних торцов упорных буртиков осей 5.

На следующем этапе разработан спаренный узел крепления двухдискового инструмента на четырехгранной призме по патенту РФ 146845. Отличием данного технического решения является то, что условие совместного свободного вращения двух дисков относительно соосных цапф-втулок достигается наличием единого сборно-разборного конструктивного блока, который выполнен в виде жестко прикрепленных друг другу двух осей с упорными буртиками, одна из которых содержит шлицевой хвостовик, а другая содержит шлицевую втулку. Такая конструкция предполагает уменьшение процесса заклинивания и износа спаренных дисковых инструментов, рациональное перераспределение эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ при зарубке исполнительного органа.

**3. Результаты и обсуждение**

В табл. и на рис. 3 представлены зависимости распределения эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ от диаметров D сопряженных конструктивных элементов узлов крепления с раздельными дисковыми инструментами к четырехгранной призме для прогнозируемого разрушения забойного массива: 1 – уголь ($\sigma_{сж}$ = 12,4 МПа); 2 – порода ($\sigma_{сж}$ = 60,6 МПа) [15]. Здесь сопрягаемыми конструктивными элементами в характерном сечении являются: диск, цапфа, ось с упорным буртиком.

Таблица 1. Распределение эквивалентных напряжений при разрушении забоя раздельным дисковым инструментом на четырехгранных призмах

| Углы заострения двух дисков $\varphi = \varphi_1+\varphi_2$, град | Забойные массивы, $\sigma_{сж}$, МПа | Полиномиальные зависимости | Коэффициенты достоверности аппроксимации $R^2$ |
|---|---|---|---|
| 5°+25° | 12,4 | $\sigma_{экв}$ = 9E-10D$^6$-4E-07D$^5$+7E-05 D$^4$-0,005D$^3$++0,1473D$^2$-0,4312D+3,5697 | 0,8307 |
| | 60,6 | $\sigma_{экв}$ = 6E-10D$^6$-3E-07D$^5$+5E-05D$^4$-0,0041D$^3$++0,1219D$^2$-0,0698D+2,6707 | 0,9093 |
| 10°+20° | 12,4 | $\sigma_{экв}$ = 9E-10D$^6$-4E-07D$^5$+7E-05D$^4$-0,0051D$^3$++0,1618D$^2$-0,792D+4,5062 | 0,8155 |
| | 60,6 | $\sigma_{экв}$ = 7E-10D$^6$-3E-07D$^5$+5E-05D$^4$-0,0033D$^3$+0,0822D$^2$+0,4756D+1,7038 | 0,8832 |
| 15°+15° | 12,4 | $\sigma_{экв}$ = 1E-09D$^6$-5E-07D$^5$+9E-05D$^4$-0,0071D$^3$++0,2323D$^2$-1,9484D+4,5644 | 0,704 |
| | 60,6 | $\sigma_{экв}$ = 6E-10D$^6$-2E-07D$^5$+3E-05D$^4$-0,0017D$^3$++0,0208D$^2$+1,1856D-0,8734 | 0,8712 |
| 0°+30° | 12,4 | $\sigma_{экв}$ = 8E-10D$^6$-4E-07D$^5$+8E-05D$^4$-0,0059D$^3$+0,1813D$^2$-0,9435D+1,7707 | 0,8275 |
| | 60,6 | $\sigma_{экв}$ = 2E-09D$^6$-8E-07D$^5$+0,0001D$^4$-0,0108D$^3$+0,3579D$^2$-3,1909D+6,9559 | 0,8572 |

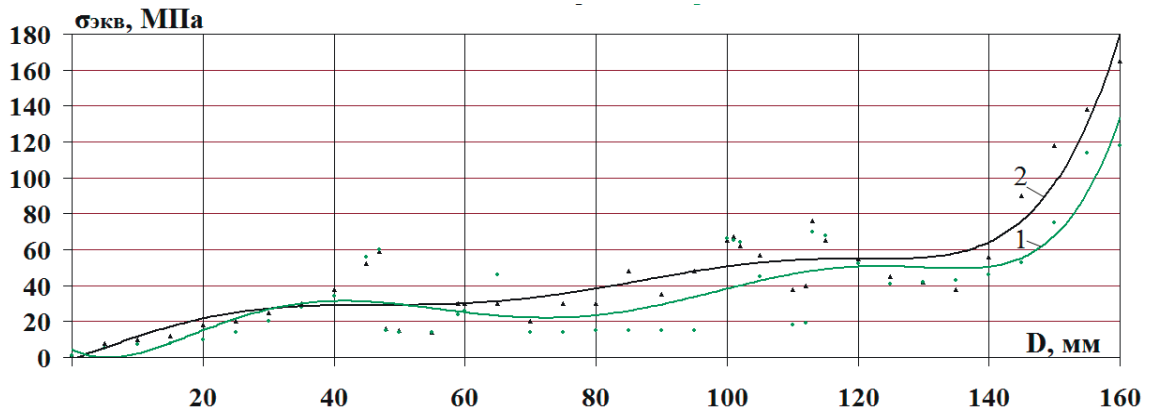



Рисунок 3 - Зависимости распределения эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ от диаметра D сопрягаемых конструктивных элементов в сечении, проходящем через клиновую реборду биконического дискового инструмента ($\varphi$ = 15°+15°) узла крепления к четырехгранной призме: 1 – $\sigma_{сж}$ = 12,4 МПа; 2 – $\sigma_{сж}$ = 60,6 МПа

Представленные технические решения и результаты исследований получены в рамках выполнения базовой части государственного задания Минобрнауки России по проекту № 632 “Исследование параметров технологий и техники для выбора и разработки инновационных технических решений по повышению эффективности эксплуатации выемочно-проходческих горных машин в Кузбассе”.

**4. Выводы**

Установлено, что процесс центральной вертикальной зарубки происходит в режиме максимальной устойчивости проходческого комбайна и значительного повышения ширины фронта зарубки с уменьшением продолжительности проходческого цикла и выравниванием времени работы левой и правой разрушающих аксиальных коронок, а, следовательно, и выравнивание их эксплуатационного ресурса. При этом ремонтные операции и замена дисковых инструментов осуществляются на месте эксплуатации.

Определено, что минимальный уровень эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ при разрушении забойных массивов ($\sigma_{сж}$ = 12,4; 60,6 МПа) отмечен установкой биконического дискового инструмента ($\varphi$ = 5°+25° = 30°; 10°+20° = 30°; 15°+15° = 30°), а максимальный уровень эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ отмечен при использовании конического дискового инструмента ($\varphi$ = 0°+30°). При этом в конструкциях биконического дискового инструмента с изменением углов заострения от асимметричного ($\varphi$ = 5°+25°; 10°+20°) до симметричного ($\varphi$ = 15°+15°) фиксируется снижение расчетного уровня максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ у симметричного диска для всех вариантов нагружения.

Зависимости эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ по критерию Мизеса от диаметра D сопрягаемых конструктивных элементов в сечении, проходящем через клиновую реборду дискового инструмента к четырехгранным призмам описывается полиномиальными зависимостями шестой степени.

## Список литературы

1. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2014 года / Таразанов И.Г. // Уголь. – 2015. – № 3. – С. 56–71.

2. *Маметьев, Л.Е.* Тенденции формирования парка проходческих комбайнов на шахтах Кузбасса / Л.Е. Маметьев, А.М. Цехин, А.Ю. Борисов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2013. – № 2. – С. 14–16.

3. ГОСТ Р 50703–2002 Комбайны проходческие со стреловидным исполнительным органом. Общие технические требования и методы испытаний.

4. Производство и эксплуатация разрушающего инструмента горных машин : монография / А.А. Хорешок, М.Е. Маметьев, А.М. Цехин, А.Ю. Борисов, П.В. Бурков, С.П. Буркова, П.Д. Крестовоздвиженский; Юрг. технолог. ин-т – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2013. – 296 с.

5. *Хорешок, А.А.* Опыт эксплуатации рабочего инструмента исполнительных органов горных машин на шахтах Кузбасса / А.А. Хорешок, А.М. Цехин, В.В. Кузнецов, А.Ю. Борисов, П.Д. Крестовоздвиженский // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 8–11.

6. *Маметьев, Л.Е.* Направление повышения зарубной способности исполнительных органов проходческих комбайнов с аксиальными коронками / Л.Е. Маметьев, А.А. Хорешок, А.Ю. Борисов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2014. – № 5. – С. 21–24.

7. *Хорешок, А.А.* Перспективы применения дискового инструмента для коронок проходческих комбайнов / А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев, В.В. Кузнецов, А.Ю. Борисов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2010. – № 1. – С. 52–54.

8. *Нестеров, В.И.* Исполнительный орган проходческого комбайна для совмещения процессов разрушения забоя с дроблением негабаритов и погрузкой горной массы / В.И. Нестеров, Л.Е. Маметьев, А.А. Хорешок, А.Ю. Борисов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2012. – № 3. – С. 112–117.

9. *Хорешок, А.А.* Распределение напряжений в узлах крепления дискового инструмента на коронках проходческих комбайнов / А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев, В.В. Кузнецов, А.Ю. Борисов, А.В. Воробьев // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2012. – № 6. – С. 34–40.

10. *Маметьев, Л.Е.* Совершенствование конструкций узлов крепления дискового инструмента на коронках проходческих комбайнов / Л.Е. Маметьев, А.А. Хорешок, А.Ю. Борисов, А.В. Воробьев // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2014. – № 1. – С. 3–5.

11. *Маметьев, Л.Е.* Разработка устройства пылеподавления для реверсивных коронок проходческих комбайнов / Л.Е. Маметьев, А.А. Хорешок, А.М. Цехин, А.Ю. Борисов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2014. – № 3. – С. 17–21.

12. *Маметьев, Л.Е.* Улучшение процессов монтажа и демонтажа узлов крепления дискового инструмента на коронках проходческих комбайнов / Л.Е. Маметьев, А.Ю. Борисов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2014. – № 4. – С. 23–26.

13. *Хорешок, А.А.* Устройства для улучшения процессов зарубки исполнительных органов проходческих комбайнов избирательного действия /

А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев, А.М. Цехин, А.Ю. Борисов // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 11–16.

14. *Хорешок, А.А.* Адаптация узлов крепления дискового инструмента исполнительных органов проходческих комбайнов к монтажу и демонтажу / А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев, А.М. Цехин, А.Ю. Борисов // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – № 7. – С. 3–8.

15. *Хорешок, А.А.* Моделирование напряженного состояния конструктивных модулей с дисковым инструментом при разрушении проходческих забоев / А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев, А.Ю. Борисов, А.В. Воробьев // Инновационные технологии и экономика в машиностроении : сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 21-23 мая 2015 г / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 424–429.

## LOADING OF THE DISK TOOL IN THE DESTRUCTION OF THE PILLAR BETWEEN THE CROWNS BY THE BOOM ROADHEADERS

**Mametyev L.E.,** D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: bau.asp@rambler.ru

**Khoreshok A.A.,** D.Sc. (Engineering), Professor, Director of the Mining Institute, e-mail: haa.omit@kuzstu.ru

**Borisov A.Yu.,** head teacher, e-mail: bau.asp@rambler.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Abstract**: Results of modeling the stress state in the mating structural elements of the attachment disk tools of the various designs on tetrahedral prisms effectors of roadheaders selective action in the destruction of coal faces. Recommended layout and set of tetrahedral prisms with disk tool on the casing of the distributing gear telescopic boom in the space between the two cutting axial crowns.

The requirements to the parameters of the step of destruction and visivamente contour path of movement and range of the discs relative to the cylindrical surface of the gear case to prevent the formation of the rock pillars in the space between axial crowns.

**Keywords:** roadheader, effector, crown, tetrahedral prism, attachment point, disk tool, coal face, destruction, stress state.

**УДК 622.24.051.52**

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОПОР ИНСТРУМЕНТА БУРОШНЕКОВЫХ МАШИН

*Л.Е. МАМЕТЬЕВ, доктор техн. наук, профессор,*
*О.В. ЛЮБИМОВ, канд. техн. наук, доцент,*
*Ю.В. ДРОЗДЕНКО, магистр техники и технологии*

650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
e-mail: oleg_lyubimov@mail.ru

**Аннотация:** Статья посвящена проблеме повышения работоспособности опор инструмента бурошнековых машин. В качестве исходных данных авторами принята информация о надежности узлов оборудования бурошнекового комплекса. На основании предложенной методики диагностирования состояния вращательно-подающего механизма бурошнековой машины проведены исследования и выработаны рекомендации, направленные на снижение уровня вибраций в опорах инструмента бурошнековых машин, в том числе за счет применения подшипников с твердосмазочным заполнителем (АФЗ). Предложена новая конструкция опоры с использованием подшипников данного типа.

**Ключевые слова:** бурошнековая машина, горизонтальное бурение, подшипниковая опора, вибрация, безотказность.

**Введение**

Установлено, что бурение горизонтальных скважин большого диаметра (свыше 1000 мм) целесообразно осуществлять по двухэтапной технологии. Разработанные в КузГТУ конструкции бурошнековых машин позволяют проводить бурение скважин малого диаметра прямым ходом с дальнейшим разбуриванием до требуемого диаметра обратным ходом. Все бурошнековые машины оснащены гидравлическими механизмами подачи и отличаются компоновочными схемами, расположением опорных элементов и гидроцилиндров перемещения [1, 2].

В ходе наблюдений за работой бурошнековых машин в промышленных условиях были получены и систематизированы результаты по простоям отдельных узлов. Установлено, что для вращательно-подающего механизма (основным элементом которого является буровой замок) за время наблюдений количество отказов составило 4 при общем времени простоя 41 ч, в то время как для бурового става при единственном отказе время простоев составило 5 ч.

Значимость количества отказов по какому-либо элементу и удельный вес простоев из-за отказа, возможно определить по коэффициенту отказов $K_O$ и коэффициенту относительных простоев $K_{ОП}$ [3]:

$$K_O = \frac{n_i}{n}, \qquad K_{ОП} = \frac{n_i T_{Bi}}{n T_B},$$

где $n_i$ – количество отказов по элементу, $n$ – общее количество отказов, $T_{Bi}$ – время простоев из-за отказа элемента, $T_B$ – общее время простоев за период наблюдений.

Результаты расчетов по определению коэффициента отказов и коэффициента относительных простоев представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что самая большая доля простоев из-за отказов приходится на механические узлы (вращательно-подающий механизм и редуктор), хотя чаще отказывает электрооборудование. Это связано с тем, что отказы механической части носят, как правило, аварийный характер и процесс её восстановления более трудоемок.

**Методика диагностических исследований в промышленных условиях**

Источником информации о силовых характеристиках работы служат данные о крутящем моменте на валу бурового става и давление в гидросистеме.

Уровень подобного рода нагрузок определяется собственными характеристиками бурошнекового оборудования, величина которых зависит как от мощности установленных приводов, так и от внешних воздействий на рабочий инструмент, складывающихся из усилия резания и усилия транспортирования разрушенного грунта по шнековому ставу.

Методика исследований позволяет решать следующие задачи:

- установить основные статистические закономерности режимов работы бурошнекового оборудования;
- определить влияние конструктивных особенностей на производительность бурового оборудования;
- разработать рекомендации по совершенствованию бурового оборудования.

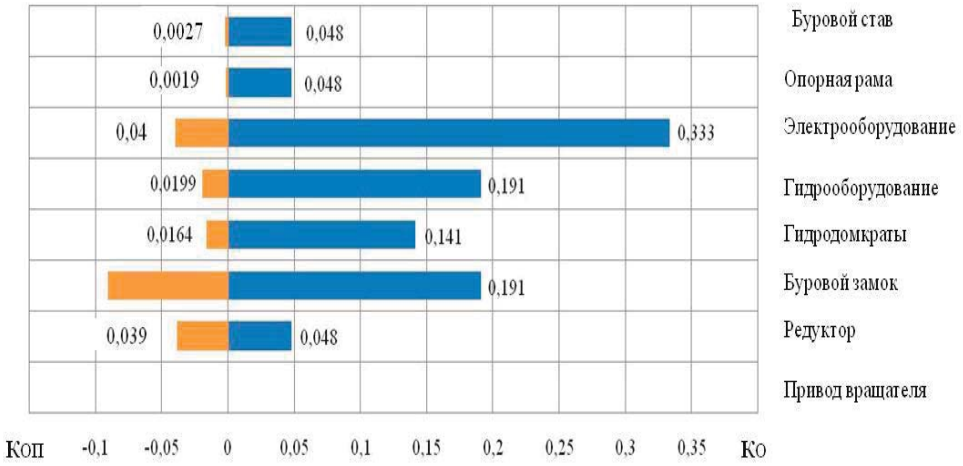



Рисунок1. Весомость коэффициентов $K_O$ и $K_{ОП}$ для определения сроков восстановления работоспособности узлов бурошнекового оборудования

Показателями, характеризующими режимы работы бурошнекового оборудования, приняты:

- среднее значение, дисперсия и коэффициент вариации измеряемых величин;
- статистические оценки крутящего момента на валу шнекового става, мощности приводного двигателя и скорости бурения.

Методика устанавливает виды, периодичность и точность измерений [4-6].

Для достоверного диагностирования и прогнозирования технического состояния бурошнекового оборудования проводились следующие мероприятия:

1) контроль и оценка технического состояния агрегатов при приемо-сдаточных испытаниях и в процессе эксплуатации;
2) выявление дефектов узлов и причины их возникновения;
3) ведение технологического режима эксплуатации оборудования с учетом параметров вибрации в узлах оборудования.

Контрольные измерения служат для распознавания и прогнозирования технического состояния бурошнекового оборудования с учетом влияния на его состояние технологических режимов эксплуатации [7].

Полное контрольное измерение вибрации должно включать в себя получение информации от обслуживающего персонала, ознакомление с рабочей документацией, осмотр оборудования, подготовку аппаратуры для измерения уровня вибрации, проведение измерения вибрации. Полное контрольное измерение вибрации производятся без вмешательства в режим эксплуатации бурошнекового оборудования.

Контрольные измерения абсолютной вибрации проводятся на корпусах подшипников узла в трех взаимно-перпендикулярных направлениях: вертикальном, горизонтальном и осевом (вдоль оси вращения).

Диагностические измерения вибрации предназначены для выявления дефектов и причин их возникновения, оценки и прогнозирования степени развития дефектов и включают в себя [7]:

- измерение вибрации всех узлов и частей бурошнековой машины, включая всю трубопроводную обвязку, элементы крепления, раму, корпуса узлов;
- выявления зависимости вибрации от изменения режима работы оборудования;
- расширенный анализ вибрации с применением всех возможностей измерительной аппаратуры.

В процессе проведения диагностических исследований регистрировались следующие параметры вибросигнала:

- среднеквадратическое значение виброскорости корпусов подшипников;
- пиковое значение виброускорения корпусов подшипников.

При этом принималось, что измеряемые параметры должны находиться в следующих диапазонах (табл. 1).

Оценка технического состояния бурошнекового оборудования, создаваемого по техническим требованиям заказчика, по результатам контрольных виброизмерений при отсутствии эксплуатационных норм, установленных заводом-изготовителем, осуществляется на основе рекомендаций [5] (табл. 2).

Таблица 1. Пороговые значения параметров вибросигнала

| Узел | Параметр | Частотный диапазон (Гц) | Динамический диапазон | Погрешность измерений (%), не более |
|---|---|---|---|---|
| Вращательно-подающий механизм | $V_e$ | 10…1000 | 0,1…30 мм/с | ±6 |
| | $a_p$ | 300…10000 | 0,1…200 м/с$^2$ | ±6 |

Таблица 2. Эффективное значение виброскорости $V_e$ в частотном диапазоне 10…1000 Гц, мм/с

| Бурошнековая машина на базе станка БГА-4 | Оценка технического состояния | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | хорошо | допустимо после ремонта | допустимо | предупреждение | требует принятия мер | недопустимо |
| Вращательно-подающий механизм | <1,8 | 1,8…2,8 | 2,8…4,5 | 4,5…6,3 | 6,3…7,1 | >7,1 |

При проведении испытаний также фиксировались: потребляемая мощность; частота вращения вала электродвигателя; скорость и усилие подачи бурового инструмента на забой. В комплект измерительной аппаратуры входил приборный комплекс для регистрации электрических характеристик, манометрический комплект [8].

Анализ спектров вибрационного сигнала, полученных на подшипниковых узлах бурошнековой установки, показал, что наиболее вероятными дефектами являются: раковины, трещины, износ тел качения, перекосы, разрушение сепаратора и нарушение смазки подшипников.

**Рекомендации по снижению уровня вибрации в узлах бурошнекового оборудования**

Уровни значений механических колебаний, генерируемых при работе подшипников, зависят от ряда выявленных факторов, их следствиями являются малый относительный ресурс и низкая эксплуатационная надежность и, как следствие, необходимость в частом техническом обслуживании.

Снижение уровня вибрации осуществляется либо воздействием на источник вибраций, либо воздействием на оборудование, в котором возникают колебательные процессы.

Значительное влияние на генерацию механических колебаний оказывает тип и качество смазки [9]. К недостаткам стандартных способов смазывания следует отнести: относительное увеличение потерь на внутреннее трение, трудность контроля за состоянием смазочного материала, затрудненное предупреждение аварийных ситуаций, связанных с возможными задирами и заклиниванием подшипника случайными загрязнениями вследствие нарушения уплотнения.

Для повышения качества работы, снижения уровня механических колебания и негативного влияния вибрации на узлы вращательно-подающего механизма бурошнековой машины на кафедрах горных машин и комплексов и прикладной механики КузГТУ разработан подшипниковый узел (рис. 2).

Он включает ступенчатый вал 1 с замковыми приспособлениями 2 и 3 для крепления к секциям бурошнекового инструмента 4, корпус 5, в котором установлены два наружных самогерметизированных радиальных 6 и два внутренних упорных 7 подшипника качения.

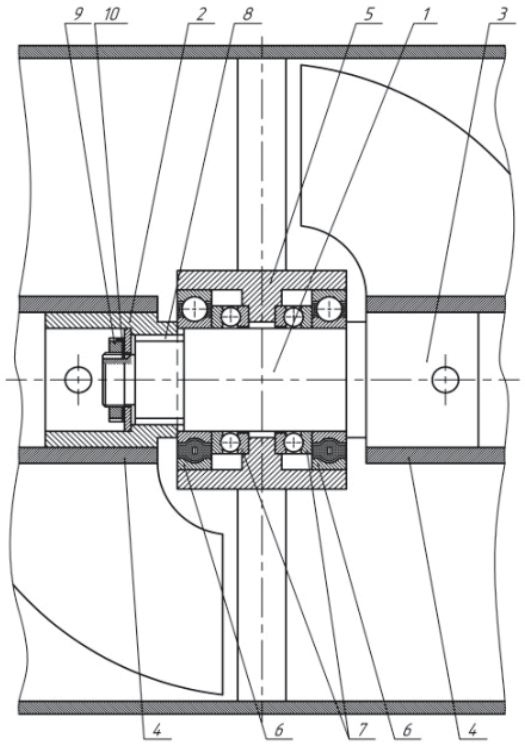



Рисунок 2 - Подшипниковый узел инструмента бурошнековых машин

Отличается предлагаемый узел тем, что на ступенчатом валу 1 выполнен шлицевой хвостовик 8, который подвижно сопряжен с одним из замковых приспособлений 2 в виде съемной шлицевой втулки с возможностью регулирования осевых зазоров, затяжки и стопорения в паре внутренних упорных подшипников качения [10]. Применение в данной конструкции радиальных подшипников с твердосмазочным антифрикционным заполнителем (АФЗ) позволит увеличить их ресурс и предотвратит попадание продуктов разрушения на трущиеся поверхности.

Результаты замеров вибрации на подшипниковом узле, который оснащен радиальными подшипниками с АФЗ, при бурении горизонтальных скважины для прокладки магистрального водовода в 10-м микрорайоне г. Прокопьевска приведены на: рис. 3 – при установке нового подшипника и рис. 4 – после 200 часов наработки.

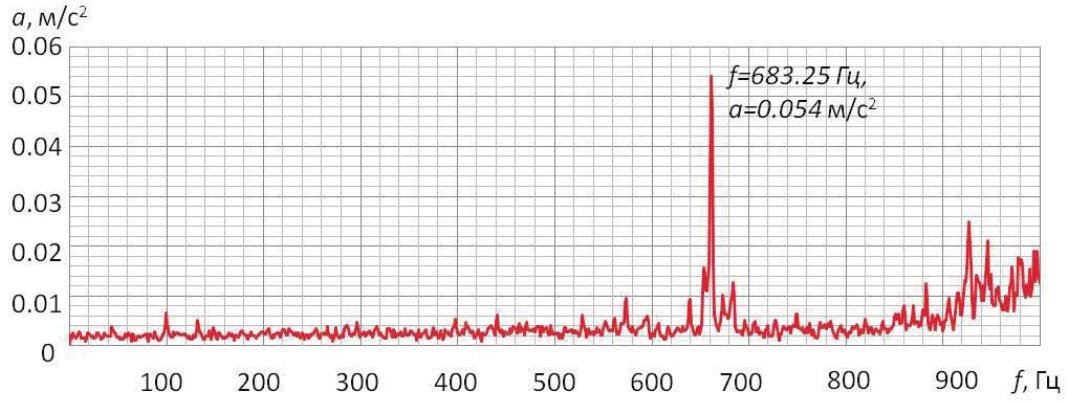



Рисунок 3 - Параметры вибрации на корпусе узла с новым подшипником

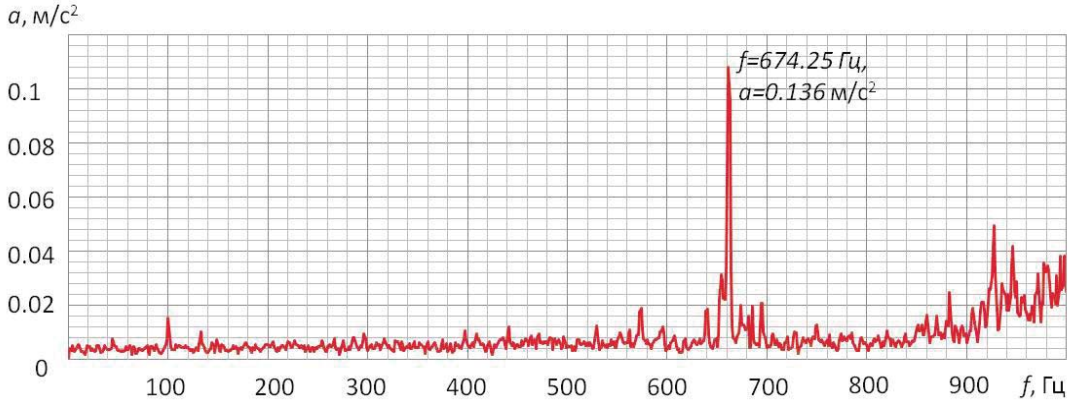



Рисунок 4 - Параметры вибрации на корпусе после 200 часов наработки

Как видно из графиков, виброускорение на подшипниках бурового замка находится в допустимых пределах.

**Выводы**

1. Установлено, что наибольшее количество простоев бурошнекового оборудования связано с обнаружением и устранением отказов, возникающих в механической части оборудования, в подшипниковых узлах вращательно-подающего механизма.
2. Выявлено, что разгерметизация корпуса подшипникового узла приводит к попаданию продуктов разрушения на трущиеся части подшипников, а следовательно, к аварийной остановке оборудования.
3. Рекомендовано применение подшипников с АФЗ для исключения попадания продуктов разрушения на трущиеся части подшипников.
4. Доказано, что применение подшипников с АФЗ снижает уровень вибрации во вращательно-подающем механизме бурошнековой машины и обеспечивает увеличение срока службы и снижение трудоемкости обслуживания.

## Список литературы

1. *Маметьев Л. Е.* Прогноз грунтовых условий при эксплуатации шнековых машин горизонтального бурения/ Механизация горных работ. Сборник научных трудов.- Кемерово: Кубас. политехн. ин-т. – 1992. с. 92-98.
2. *Маметьев Л. Е., Дрозденко Ю. В., Любимов О. В.* Результаты внедрения бурошнековых машин для бестраншейной прокладки коммуникаций. Материалы 27-й конференции и выставки Международного общества по бестраншейным технологиям NO-DIG 2010 – M: SIBICO International Ltd., 2010.
3. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Контроль состояния машин по результатам измерения вибрации на невращающихся частях. Часть I. Общие требования.
4. ГОСТ ИСО 10816-3-99. Контроль состояния машин по результатам измерения вибрации на невращающихся частях. Часть III. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин-1.
5. ГОСТ 16921-83. Машины электрические вращающиеся. Допустимая вибрация.
6. ИСО 2373. Механическая вибрация вращающихся электрических машин с высотой вала 80-400 мм. Измерение и оценка интенсивности вибрации.

7. Диагностика горных машин и оборудования./ Б. Л. Герике, П. Б. Герике, В.С. Квагинидзе, Г.И. Козовой, А. А. Хорешок // М.: ИПО «У Никитских ворот», 2012. – 400 с.

8. *Маметьев Л. Е., Дрозденко Ю. В., Любимов О. В.* Результаты разработки подшипниковых опор шнекового става для машин горизонтального бурения/ Сборник докладов конференции No-Dig 2012. – М.: SIBICO International Ltd. - 2012.

9. Узлы трения машин / И.В. Крагельский, Н.М. Михин и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

10. Опорный подшипниковый узел секционного бурошнекового инструмента: пат. 144475 РФ / Маметьев Л.Е., Любимов О.В., Дрозденко Ю.В.; опубл. 20.08.2014, бюл. № 23.

## IMPROVEMENT OF THE STRUCTURE OF AUGER TOOL'S SUPPORTS

**Mametyev L. E.,** D.Sc. (Engineering), Professor
**Lyubimov O. V.,** C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: oleg_lyubimov@mail.ru
**Drozdenko Y. V**., M.Sc (Engineering), e-mail: uvd1@rambler.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Abstract:** The article is devoted to the problem of increasing of auger tool's support's working capacity. As the initial data authors had information about the reliability of auger complex's units. Researches based on the proposed methods of diagnosing the state of the auger's rotationally feeding mechanism allow to make recommendations on reducing vibrations in auger tool's supports including by antifriction bearings with the solid lubricating filler. The new structure of the auger tool's support bearing unit has been proposed.

**Keywords:** auger, horizontal boring, bearing unit, vibration, reliability.

**УДК 338.532.4.025.24**

# РОССИЙСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ: ТАРИФНЫЕ БАРЬЕРЫ РАЗВИТИЯ

*О. В. АСКАНОВА, доктор экон. наук, доцент*
*(РИИ АлтГТУ, г. Рубцовск, Россия)*

Асканова О.В. – 658207, Алтайский край, г. Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6,
Рубцовский индустриальный институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
e-mail: asckanova@yandex.ru

**Аннотация:** В статье отмечается, что критическое положение, сложившееся в российском машиностроении, связано с неэффективной политикой государства. При этом автор акцентирует внимание на одном из инструментов государственного воздействия – антимонопольной политике, призванной обеспечить механизмы роста машиностроительного производства. Проведённое исследование показало, что пока тарифы естественных монополий негативно воздействуют на отечественный машиностроительный сектор, выступая барьером его развития.

**Ключевые слова:** машиностроение, состояние, проблемы, антимонопольная политика, тарифы естественных монополий.

Роль машиностроения в современном мире сложно переоценить ввиду того, что этот сектор экономики определяет индустриальную мощь государства, его экономическую и политическую независимость. При этом для России значение машиностроительной отрасли более существенно, поскольку, как справедливо заметил Р. Гринберг, «атомная держава не может не иметь собственного машиностроения» [1].

Признание за машиностроительным сектором приоритета развития в советский период обуславливало опережение темпов его роста над темпами роста промышленности в целом. Однако либеральные реформы 90-х привели к катастрофическим последствиям в отрасли, от которых отечественное машиностроение не оправилось и по сей день.

В настоящее время в соответствии с ОКВЭД машиностроительный сектор РФ включает три вида деятельности и только по одному из них объёмы производства превышают уровень 1991 года (таблица 1).

По отельным видам машиностроительной продукции ситуация гораздо более тяжёлая (таблица 2).

Данные таблицы 2 свидетельствуют, что Россия практически полностью лишилась собственного станкостроения и тракторостроения. Глобальными потерями характеризуется производство экскаваторов и бульдозеров. Подобные изменения нельзя интерпретировать иначе, как развал машиностроения России, масштаб которого невозможно объяснить никакими внутрихозяйственными причинами.

Таблица 1. Индексы производства в машиностроении по видам экономической деятельности, % (за базу принят 1991 год) [составлено по 2, 3]

| Вид экономической деятельности | 1992 | 2000 | 2005 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Производство машин и оборудования | 84,4 | 32,3 | 44,9 | 63,3 | 42,3 | 48,7 | 54,1 | 55,5 | 53,7 | 49,5 |
| Производство электрооборудования, электронного и оптического оборудования | 79,8 | 45,2 | 116,1 | 137,1 | 93,8 | 111,5 | 124,8 | 132,8 | 131,4 | 130,7 |
| Производство транспортных средств и оборудования | 85,3 | 53,1 | 52,7 | 59,7 | 40,9 | 52,0 | 61,0 | 67,2 | 68,7 | 74,5 |

Таблица 2. Производство некоторых видов продукции машиностроения

| Вид продукции | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2013 к 1990, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Тракторы на колесном ходу, тыс. шт. | 92,6 | 10,8 | 6,9 | 4,5 | 7,7 | 11,2 | 6,0 | 6,9 | 13,2 | 13,6 | 7,6 | **8,2** |
| Тракторы на гусеничном ходу, тыс. шт. | 121 | 10,4 | 12,4 | 4,1 | 6,3 | 6,1 | 1,6 | 0,8 | 1,7 | 1,2 | 1,1 | **0,9** |
| Металлорежущие станки, шт. | 74171 | 18033 | 8885 | 4867 | 5104 | 4847 | 1882 | 2800 | 3300 | 3400 | 2900 | **3,9** |
| Кузнечно-прессовые станки, шт. | 27302 | 2184 | 1246 | 1533 | 2700 | 2747 | 1266 | 2218 | 2492 | 2098 | 1834 | **6,7** |
| Экскаваторы, шт. | 23121 | 5234 | 3370 | 3565 | 6272 | 5506 | 1391 | 2100 | 2200 | 1900 | 1800 | **7,8** |
| Бульдозеры, шт. | 14131 | 2404 | 3020 | 1774 | 3349 | 3139 | 721 | 911 | 1807 | 1371 | 1214 | **8,6** |

Примечание: данные с 1990 по 2009 гг. – источник [4], данные за 2010-2013 гг. – источник [2].

На наш взгляд, неблагоприятная конъюнктура в машиностроительном секторе сформирована в первую очередь действующей в РФ государственно-управленческой моделью, в основе которой лежит постулат о противоречии защиты неконкурентоспособного машиностроения теории эффективного рыночного хозяйства, в то время как мировой опыт свидетельствует о невозможности развития технологически сложные производства без поддержки и защиты государства.

Справедливости ради следует отметить, что в последнее время наметился некоторый сдвиг в осознании необходимости поддержки отдельных секторов реальной экономики, в том числе и машиностроения, но реализуемые государством меры пока не носят системного характера и неадекватны масштабу существующих проблем.

Сегодня деструктивное воздействие государства на отечественный сектор обрабатывающей промышленности вообще и машиностроение, в частности проявляется через различные инструменты, основными из которых, на наш взгляд, являются:

- антимонопольные меры, неэффективность которых завышает затраты промышленных предприятий, делая их продукцию неконкурентоспособной;

- денежно-кредитная политика, неадекватность которой сдерживает экономический рост в реальном секторе экономики;

- налоговая политика, нерациональность которой делает налоговую нагрузку российского реального сектора несопоставимой со многими странами;

- присоединение России к Всемирной торговой организации (ВТО) на заведомо невыгодных для отечественных производителей условиях в ситуации хронической неконкурентоспособности экономики, дезинтеграции народного хозяйства [5].

Парадоксы российской денежно-кредитной политики, налоговой системы и разрушительные последствия ратификации протокола о присоединении РФ к Марракешскому соглашению об учреждении ВТО достаточно широко освещены отечественными экономистами. Здесь же ввиду ограниченного объёма статьи считаем необходимым более подробно остановиться на вопросе влияния на машиностроительный сектор цен и тарифов на продукцию и услуги монополий, «аппетиты» которых в отсутствии действенной *антимонопольной политики* достигли гигантских размеров [6].

Важнейшей целевой установкой антимонопольной политики является пресечение монопольных злоупотреблений и обеспечение добросовестной ценовой конкуренции, но реализуемые сегодня в России антимонопольные меры пока не позволяют достичь обозначенной цели. Устойчивая на протяжении длительного времени тенденция опережающего роста цен и тарифов на монопольные услуги в сравнении с ростом цен на машиностроительную продукцию (таблица 3) негативно сказывается на финансовом положении и конкурентоспособности машиностроителей, выступая барьером развития отрасли.

Таблица 3. Индексы цен на различные виды продукции, услуг [составлено по 7]

| Показатель | Индекс цен в процентах к предыдущему периоду | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2000 | 2005 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
| Приобретенная промышленными организациями тепловая энергия | 136,4 | 118,2 | 118,0 | 110,3 | 106,7 | 107,2 | 112,7 |
| Приобретенная промышленными организациями электроэнергия | 142,9 | 109,9 | 120,2 | 113,3 | 107,5 | 108,2 | 109,1 |
| Приобретенный промышленными организациями газ | 126,1 | 119,1 | 121,9 | 114,2 | 113,5 | 112,9 | 116,6 |
| Приобретенное промышленными организациями дизельное топливо | 156,2 | 130,9 | 94,0 | 117,1 | 126,6 | 111,0 | 106,1 |
| Грузовые перевозки железнодорожным транспортом | 169,3 | 113,3 | 110,6 | 109,4 | 107,5 | 105,6 | 105,4 |
| Грузовые перевозки автомобильным транспортом | 136,6 | 114,3 | 97,5 | 103,7 | 110,2 | 105,3 | 104,2 |
| **Машины и оборудование** | **130,6** | **110,4** | **103,7** | **105,5** | **105,4** | **104,1** | **101,9** |

Заметим, что предприятия машиностроения не имеют гибкого механизма ценообразования, при расчете цен на продукцию они вынуждены учитывать возможные повышения монополистами цен на топливо, электроэнергию, грузоперевозки и при превышении последними заложенных в цене лимитов автоматически повышать отпускную цену своей продукции либо жертвовать и без того крайне низкой рентабельностью.

Как отмечает академик С.Ю. Глазьев, во всех уважающих себя странах государство жестко пресекает злоупотребления монополистов, однако в России огромный зарубежный опыт регулирования рынка в целях обеспечения добросовестной конкуренции оказался невостребованным [6]. Вследствие этого по отдельным видам услуг монополистов тарифы в России превышают уровень некоторых стран, делая производство машиностроительной продукции неконкурентоспособным.

В подтверждении вышеотмеченного можно привести информацию, представленную в аналитической записке К.А. Бабкина [8], который сопоставляя условия машиностроительного производства в России и Канаде, установил, что тарифы на поставку электроэнергии для крупных промышленных предприятий в России в 2,2 раза выше, чем в Канаде. В. Сальников, подробно изучивший динамику цен и тарифов на электроэнергию в макроэкономическом контексте [9], указывает, что российская цена на электроэнергию уже выше, чем в ряде стран Европы и вплотную приблизилась к уровню цен в США. Интересными представляются выводы, к которым приходит В. Овсейчук [10] в результате сопоставления тарифов на электроэнергию в России и в США по паритету покупательной способности (ППС) национальных валют (таблица 4).

Таблица 4. Тарифы на электроэнергию по ППС национальных валют (по данным 2011г.)

| Показатель | Россия | США | Россия/США |
|---|---|---|---|
| Цены на электроэнергию в среднем по стране, цент/Квт-ч | 13,9 | 10,04 | 1,38 |
| Цены на электроэнергию для промышленности, цент/Квт-ч | 11,7 | 6,95 | 1,68 |

Из представленных данных следует, что если рассматривать тарифы на электроэнергию по ППС, то в России они выше, чем в США в целом по стране на 38%, а в промышленности – на 68%. Отметим, что тарифная политика в электроэнергетике является мощным инструментом регулирования в вопросах приоритетных направлений развития государства. Поэтому западные страны широко применяют льготные тарифы или компенсации для предприятий промышленности, выпускающих высокотехнологичную продукцию.

Сегодня можно встретить мнения отдельных исследователей, которые ссылаясь на незначительную долю затрат на топливо и энергию в себестоимости машиностроительной продукции, пытаются доказать несущественное влияние действующих тарифов на сектор машиностроения. Действительно, удельный вес затрат на топливо в себестоимости продукции по виду экономической деятельности «Производство машин и оборудования» в последние годы не превышал 1,5%, а на энергию – 3% (таблица5).

Таблица 5. Доля отдельных затрат в себестоимости продукции по виду экономической деятельности «Производство машин и оборудования», % [11]

| Показатель | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|---|---|---|---|---|
| Материальные затраты | 57,7 | 62,1 | 64,7 | 59,4 |
| из них сырьё и материалы | 51,4 | 53,3 | 49,9 | 51,6 |
| топливо | 1,4 | 1,3 | 1,4 | 1,2 |
| энергия | 2,7 | 2,4 | 1,9 | 2,2 |

Вместе с тем, даже на первый взгляд незначительная доля затрат на топливо и энергию в себестоимости отечественной машиностроительной продукции обеспечивает более высокие удельные энергетические затраты в сравнении с другими странами в силу несопоставимости энергоемкости российской промышленности. Так, например, в тех же США удельный вес расходов на топливо в выручке машиностроительного сектора в четыре раза ниже, чем в России (0,2% против 0,8%). Расходы на электроэнергию занимают 0,6% в выручке от реализации продукции американского машиностроения при 1,1% в России [9].

В невыигрышном положении российские машиностроители и по другим условиям конкуренции, например, грузоперевозкам. Так, значительный рост железнодорожных тарифов в последнее время привёл к тому, что в 2013 году услугами железнодорожного транспорта стало выгодно пользоваться при перевозке грузов на расстояние от 1,5 тыс. км, что в два раза больше, чем в 2008 году. Что касается автоперевозок, то цены на перевозку продукции грузовыми тралами в России более чем в полтора раза превышают канадские [8].

Отмеченная ситуация, учитывая территориальные и климатические особенности нашей страны, ставит отечественных машиностроителей в заведомо невыгодные конкурентные условия. Отрадно, что сегодня наличие проблемы злоупотреблений монополистов признается и на высшем уровне руководства страной. Так, президент В.В. Путин, выступая на Петербургском международном экономическом форуме, заявил, что «опережающий рост тарифов естественных монополий стал самостоятельным и значимым фактором раскручивания инфляции и реальным фактором торможения экономики, роста издержек и потери конкурентоспособности отечественных производителей» [12]. Именно поэтому одной из наиболее желанных мер со стороны правительства для промышленности является ограничение роста регулируемых тарифов на железнодорожные перевозки, газ и теплоснабжение. Подобные действия ожидали 68% предприятий в 2011 году (первое место) и 60% предприятий в 2012 году (второе место).

В этой связи становится всё более очевидным, что пресечь монопольные злоупотребления и обеспечить добросовестную ценовую конкуренцию и, как результат, запустить нормальные рыночные механизмы роста производства в машиностроении способна жёсткая антимонопольная политика, реализуемая в комплексе с другими инструментами государственного воздействия.

## Список литературы:

1. Пресс-конференция МЭФ – за развитие производства! [Электронный ресурс]. URL: http://www.omt.ms/news/2013-07-15-51 (дата обращения 22.02.2014).

2. Россия в цифрах-2014 г. // Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru (дата обращения 22.04.2015).

3. Россия-2015. Статистический справочник // Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru (дата обращения 28.04.2015).

4. Производство машин и оборудования [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/prom/natura/natura38g.htm (дата обращения 20.02.2014).

5. *Асканова О.В*. Состояние российского машиностроения: побочное следствие или закономерный результат экономической политики государства? // ЭКО. – 2014. – №7(481). – С. 12-24.

6. *Глазьев С.Ю.* Как остановить ценовой беспредел? // Официальный сайт С.Ю. Глазьева [Электронный ресурс]. URL: http://www.glazev.ru/artdifferent/116 (дата обращения 21.03.2014).

7. Цены в России. 2014: Стат. сб. / Росстат – М., 2014. – 151 с.; Россия в цифрах. 2014: Крат. стат. сб./ Росстат. – М., 2014. – 558 с.

8. *Бабкин К.А.* Почему тракторный завод останется в Канаде. [Электронный ресурс]. URL: http://babkin-k.livejournal.com/182898.html (дата обращения 25.11.2013).

9. *Сальников В.* Динамика цен и тарифов на электроэнергию: макроэкономический контекст. [Электронный ресурс]. URL: http:// http://www.hse.ru/data/2014/09/30/1100422424 (дата обращения 26.04.2015).

10. *Овсейчук В.* Тарифная политика // Новости электротехники: информационно-

справочное издание. – 2012. – №4(76). [Электронный ресурс]. URL: http://www.news.elteh.ru/arh/2012/76/13.php (дата обращения 28.04.2015).

11. Промышленность России, 2014 // Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. [Электронный ресурс]. URL: http:// http://www.gks.ru (дата обращения 28.04.2015).

12. С 2014 года тарифы естественных монополий будут расти только на уровень инфляции [Электронный ресурс]. URL: http://www.b-port.com/index/item/107915.html (дата обращения 22.04.2014).

## RUSSIAN MECHANICAL ENGINEERING: TARIFF DEVELOPMENT BARRIER

**Askanova O.V.**, Doctor of Science Economics, e-mail: asckanova@yandex.ru

Rubtsovsk Industrial Institute (Branch) of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "I.I. Polzunov Altai State Technical University", 2/6 street Tractor, Rubtsovsk, 658207, Russian Federation

**Abstract:** The article notes, that the critical situation, arisen in the Russian mechanical engineering, is connected with ineffective government policy. At the same time, the author focuses on one of the instruments of state influence – antimonopoly policy, which is appealed to provide growth mechanisms of machinery production. The carried out investigation has shown that the natural monopolies' tariffs yet influence negatively on the domestic mechanical engineering sector, being a barrier of its development.

**Keywords:** mechanical engineering, state, problems, antimonopoly policy, natural monopolies' tariffs

**УДК 338.532.4.025.24**

# ВЛИЯНИЕ ИНТЕГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА РАЗВИТИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СТРАН ТАМОЖЕННОГО СОЮЗА

*А. В. КАРПЕНКО, к.э.н.*

Рубцовский индустриальный институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»
658207, г. Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6. E-mail: aleksandr484@yandex.ru

**Аннотация:** В работе рассмотрены основные проблемы и трудности развития машиностроительной индустрии в рамках стран ТС и ЕЭП. Важным аспектом анализа является характеристика влияния интеграционного сотрудничества на реализацию программ модернизации отрасли и обеспечение глобальной конкурентоспособности машиностроительной продукции региона.

**Ключевые слова**: машиностроение, модернизация, экономическая интеграция, Таможенный союз, Единое экономическое пространство.

Повышение эффективности различных отраслей промышленности, как и экономики в целом, непосредственно связано с развитием машиностроительного сектора страны. Продолжающиеся интеграционные процессы на постсоветском пространстве привели к прогрессивным сдвигам в этом производстве – трансформации основных характеристик рынка, смене форм собственности ряда предприятий, изменениям в объеме и структуре машиностроительной продукции, а также характере государственного регулирования отрасли. Формирование Таможенного союза (ТС) создало благоприятные условия для роста торговли и развития экономики, усиления инновационной активности субъектов хозяйствования, а также позволило получить дополнительные преимущества, включая доступ к ресурсам всего региона, расширение рынков сбыта, защиту интересов предприятий стран-участниц интеграции от конкуренции со стороны коммерческих предприятий других стран. В то же время, унаследовав особенности плановой экономики, машиностроительный комплекс большой евразийской тройки Россия-Беларусь-Казахстан имеет схожую историю развития и общие проблемы, препятствующие реализации потенциала отрасли (изношенность основного капитала, низкая степень вливания инвестиций и др.). Поэтому одним из приоритетных стратегических направлений развития национальных экономик интегрирующихся стран является обеспечение глобальной конкурентоспособности машиностроения [1].

Текущая ситуация в машиностроительном производстве региона нестабильна, отрасль подвержена влиянию глубинных макроэкономических тенденций и конъюнктуры отдельных географических рынков сбыта. Характерной чертой последних лет является снижение производства отдельных видов машиностроительной продукции, что связано во многом с торможением внутреннего спроса в условиях начавшейся стагнации национальных экономик. Несмотря на то, что машиностроение стран-участников Таможенного союза продолжает оставаться одной из ведущих отраслей обрабатывающей промышленности, формируя пятую часть в ее отгрузке, доля мирового рынка, занимаемого машиностроительными компаниями Единого экономического пространства (ЕЭП), незначительна и не превышает 0,4% (хотя до начала 1990-х годов доля машин и оборудования, поставляемых на внешний рынок из СССР, составляла порядка 15-18%).

В целом машиностроение стран-участниц ТС и ЕЭП ориентировано преимущественно на внутренний рынок. Технологическое отставание от лидеров мирового машиностроения (Германия, США, Япония и др.), а также отсутствие развитой институциональной и финансовой системы поддержки несырьевого экспорта (за исключением рынка вооружений и некоторых видов продукции гражданского назначения) не позволяют наращивать объемы реализации своей продукции за пределы региона. В товарной структуре экспорта государств – членов ТС во внешней торговле с третьими странами удельный вес машиностроительной продукции в 2014 г. занимает всего лишь 2,8% [2]. При этом отсутствие масштабного производства многих видов машиностроительной продукции делает страны региона зависимыми от иностранной техники и ее комплектующих (доля импорта составляет 45,5%).

Во многом низкий уровень конкурентоспособности машиностроительной продукции региона определяется высокой энергоемкостью производства, которая в 3-4 раза выше, чем в европей-

ских странах (рис. 1), а также диспропорцией цен на энергоресурсы в результате неэффективности тарифной политики. В качестве иллюстрации этой проблемы можно привести тот факт, что средняя стоимость 1 кВт/ч электроэнергии для промышленных потребителей в США составляет 7,01 цента, в то время как в России – 12,59 цента, в Беларуси – 13,86 цента. Логическим следствием такого положения дел является низкий уровень рентабельности продукции машиностроительного сектора и увеличение доли убыточных организаций.

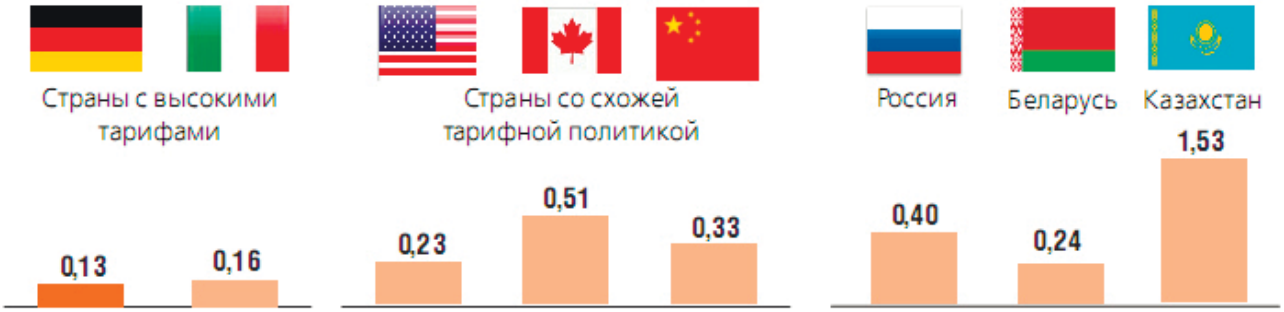



Рисунок 1 - Энергоемкость промышленного производства, тонн усл. топлива на тыс. долл. США [3]

Не менее важными сдерживающими факторами развития отрасли являются низкая производительность труда, значение которой в 6-7 раз уступает уровню европейских стран-лидеров, а также состояние материально-технической базы. Степень физического износа в отрасли колеблется в диапазоне от 40 до 50%, основное технологическое оборудование морально изношено на 90%, порядка 20% основных фондов подлежит немедленному списанию по причине абсолютной изношенности. В то же время, невзирая на тенденцию снижения технико-технологического уровня производства, доля инвестиционных вложений в активную часть основных средств остается крайне низкой (табл. 1), в результате чего решение поставленной задачи по модернизации производств и созданию необходимых условий экономического роста региона в будущем требует глубокой проработки.

Таблица 1. Размер и удельный вес инвестиций в машиностроение в общем объеме инвестиций в основной капитал промышленности [4]

| | 2011 | | 2012 | | 2013 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | млн. долл. | уд. вес, % | млн. долл. | уд. вес, % | млн. долл. | уд. вес, % |
| Россия | 7 519,5 | 2,1 | 8 642,0 | 2,2 | 10 427,5 | 2,5 |
| Беларусь | 605,9 | 8,6 | 628,7 | 9,9 | 842,0 | 9,9 |
| Казахстан | 303,3 | 1,8 | 328,4 | 1,7 | 332,8 | 1,6 |
| **ТС и ЕЭП** | **8 428,7** | **12,5** | **9 599,1** | **13,8** | **11 602,3** | **14,0** |

В подобных условиях определяющим для инвестирования на предприятиях и роста деловой активности становится объём собственных финансовых ресурсов, а в их отсутствии – доступность банковских кредитов. Перефразируя слова А.И. Герцена, это те гранитные камни преткновения на пути развития машиностроения, которые были и остаются во все времена. Высокий уровень процентных ставок по сравнению с кредитными ставками зарубежных стран ставит машиностроительные предприятия региона в неравные конкурентные условия с иностранными производителями. Для сравнения, средняя процентная ставка по кредитам в странах Евросоюза не превышает 5-6% (Италия – 4,32%, Германия – 5,4%), что как минимум в три-четыре раза выгодней аналогичных предложений от банков региона. Важность данной проблемы подчеркивает и тот факт, что в 2014 году за счет банковских кредитов странами ТС и ЕЭП было профинансировано лишь 17,3% инвестиций в основной капитал. В этой связи ключевую роль в развитии системы финансирования машиностроения региона должен играть Евразийский банк развития, деятельность которого призвана обеспечить доступ к дешевым кредитным ресурсам для реального сектора, устранение узких мест, созданных фрагментацией финансовых рынков, а также поиск альтернативных источников финансирования.

Несмотря на ущербность нынешнего состояния машиностроительного производства, создание Единого экономического пространства вселяет большие надежды на реформирование отрасли. В частности, перспективным направлением в области сотрудничества и экономическо-

го взаимодействия стран ТС и ЕЭП в области машиностроения является работа по созданию совместных сборочных производств и получения преимуществ от кооперации. Наглядный пример – совместные производства по сборке карьерной и шахтной техники, легковых и грузовых автомобилей, тракторов, зерно- и кормоуборочных комбайнов, грузопассажирских лифтов, строительной и коммунальной техники и др. Кроме того, динамично растущий рынок государств-участников ЕЭП представляет значительный интерес для третьих стран и открывает дополнительные возможности привлечения иностранных инвестиций в обрабатывающую промышленность. При этом более выгодные условия по созданию новых производств и наличие достаточно емкого рынка сбыта могут рассматриваться в качестве одного из факторов, способствующим освоению и распространению иностранных технологий и ключевых компетенций.

Перспективы развития машиностроения также связаны с положительными тенденциями в части гармонизации налогового законодательства стран-участниц ТС, оптимизации налогообложения в целом и развития системы налоговых льгот и преференций. В частности, уже сейчас применяется нулевая ставка НДС по экспортным операциям, в активной фазе проработки находится вопрос унификации ставок акцизов государств-участников ТС, предусматривающей сближение ставок по наиболее чувствительным подакцизным товарам. Согласно ежегодному рейтингу «Ведение бизнеса-2015», подготовленному Всемирным банком [5], страны ТС и ЕЭП за последние несколько лет существенно продвинулись в налоговом администрировании, опередив такие индустриально развитые страны, как Япония и Германия (табл. 2). Подобное стало возможным благодаря сокращению количества уплачиваемых налогов, а также за счет внедрения электронных систем регистрации. Однако, несмотря на определённые успехи в области фискальной политики, уровень налоговой нагрузки на предприятия остается достаточно высок. Кроме того, различия национальных уровней налогообложения, а также разные условия предоставления льгот и субсидий препятствуют справедливой ценовой конкуренции на территории ТС и ЕЭП и приводят к возникновению у предприятий дополнительных издержек [6, стр. 161–162]. Решение этих проблем требует дальнейшего совершенствования системы налогообложения стран Таможенного союза.

Таблица 2. Рейтинг отдельных стран по уровню налогового администрирования

| Показатель | Россия | Беларусь | Казахстан | Канада | Япония | Германия |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Количество платежей в год | 7 | 7 | 6 | 8 | 14 | 9 |
| Затраты времени на налоговое администрирование, час. в год | 168 | 183 | 188 | 131 | 330 | 218 |
| Общая налоговая ставка, % прибыли | 48,9 | 52,0 | 28,6 | 21,0 | 51,3 | 48,8 |
| **Место в рейтинге** | **49** | **60** | **17** | **9** | **122** | **68** |

Не менее важным механизмом развития потенциала отрасли и содействия импортозамещению основной машиностроительной продукции остаются государственные программы финансирования развития отрасли. На сегодняшний день в странах-участницах ТС действует свыше 80 средне- и долгосрочных программных документов, регулирующих процессы развития национальных промышленных комплексов (рис. 2). Целевые программы развития достаточно подробно определяют особенности применения мер финансовой, информационной, консультационной поддержки, меры стимулирования промышленной деятельности, территориальные аспекты развития машиностроения, однако главный их недостаток в том, что они носят изолированный характер. Каждая из сторон отдает предпочтение собственным приоритетам по наращению объемов экспорта своей продукции, зачастую пренебрегая общей направленностью на формирование единого рынка в рамках ЕЭП с учетом специализации друг друга. Внутренние рынки союзников рассматриваются с позиции потенциальной экспортной ниши для своей продукции, в результате чего происходит перенасыщение рынка однородной продукцией, а это в свою очередь ведет к неконструктивной конкуренции.

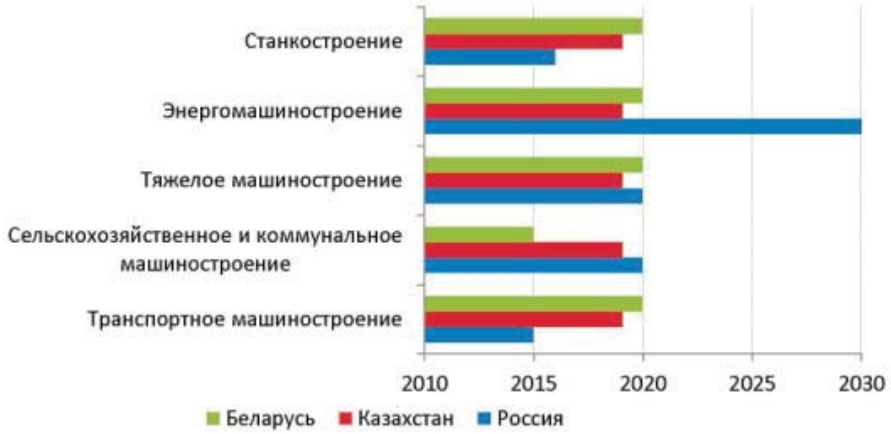



Рисунок 2 - Горизонт планирования национальных программ развития наиболее приоритетных подотраслей машиностроения [7]

Тем не менее, несмотря на некоторую несогласованность в промышленной политике региона, государственная поддержка несет под собой объективные причины и охватывает предприятия, инвестиционные проекты которых в первую очередь направлены на модернизацию и техническое перевооружение действующих производств, а также создание новых производств, обеспечивающих высокий уровень добавленной стоимости в цене продукции. В частности, только на модернизацию вагоностроительной отрасли в 2015-2016 гг. из федерального бюджета РФ будет выделено около 1,2 млрд. руб., ещё 2,35 млрд. руб. – в качестве субсидий на поддержку закупок инновационных вагонов. Стоит при этом отметить, что помимо традиционных инструментов поддержки индустрии машиностроения (гарантированный госзаказ, субсидирование процентных ставок по кредитам), используются также такие компоненты, как специальные инвестиционные контракты, поддержка через государственные институты развития, создание индустриальных зон и технопарков и др.

Таким образом, несмотря на достаточно сложную обстановку в отрасли, в настоящее время сложился ряд объективных предпосылок возрождения машиностроительного комплекса региона. Наличие исторически сложившихся связей машиностроительных производств, общность границ, развитие единых транспортных, энергетических и информационных систем, проведение согласованной налоговой, торговой, таможенной и тарифной политики позволяют обеспечить проявление системной эмерджентности, способствуя тем самым достижению нового качественного роста. При этом векторами дальнейшего приложения усилий национальных экономик стран-партнеров должны стать линии наибольшего соответствия приоритетов в области развития науки и технологий, построения инновационной инфраструктуры, создания и укрепления технологических платформ.

## Список литературы

1. *Асканова О.В., Карпенко А.В.* Анализ конкурентоспособности машиностроительного комплекса России в посткризисный период // Актуальные проблемы экономики и права, 2011. – № 3. – С. 50–55.

2. Социально-экономическое положение государств – членов Таможенного союза и Единого экономического пространства в январе-декабре 2014 года: статистический бюллетень; Евразийская экономическая комиссия. – Москва, 2015. – 148 с.

3. Итоги работы ТЭК России в 2013 году. Задачи на среднесрочную перспективу. Министерство энергетики Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: http://smartmetering.ru/common/upload/itogi_TEK_2013.pdf (дата обращения: 03.05.2015).

4. Государства – члены Таможенного союза и Единого экономического пространства в цифрах: краткий статистический сборник; Евразийская экономическая комиссия. – Москва: 2015. – 180 с.

5. Doing Business 2015: Going Beyond Efficiency. Washington, DC: World Bank, 331.

6. *Пантелеев А.А., Почтарев Н.Е., Чалая Ю.Ю.* Национальные стратегии экономического развития государств – членов ТС и ЕЭП: сравнительный анализ и возможности для реализации интеграционного потенциала // Вестник международных организаций, 2015.– Т. 10. – № 1. – С. 159–181.

7. О результатах анализа национальных программ Беларуси, Казахстана и России в сфере промышленности; аналитическая записка [Электронный ресурс]. URL: http://www.eurasiancommission.org/ru/act/prom_i_agroprom/dep_prom/Pages/ Аналитические-

материалы-пром.aspx (дата обращения: 11.05.2015).

# THE INFLUENCE OF INTEGRATION PROCESSES ON THE DEVELOPMENT OF THE ECONOMIC POTENTIAL OF MACHINE BUILDING COMPLEX OF THE MEMBER STATES OF THE CUSTOMS UNION

**Karpenko A. V.**
Rubtsovsk Industrial Institute, Branch of Altai State Technical University named after I.I. Polzunov,
658207, Rubtsovsk, Traktornaya street, 2/6. E-mail: aleksandr484@yandex.ru

**Abstract:** The article deals with the main issues and challenges of the engineering industry in within the states of the Customs Union and the Common Economic Space. An important aspect of the analysis is to characterize the integration and cooperation impact on the implementation of industry upgrading programs and the maintenance the global competitiveness of engineering products in the region.

**Keywords**: machine building, modernization, economic integration, Customs Union, Common Economic Space.

**УДК 65. 290**

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА СТРАТЕГИИ АНТИКРИЗИСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

*Л. М. КОРОТКЕВИЧ*, *канд. экон. наук, доцент*,
*Н. В. ЗЕЛЕНКОВСКАЯ*, *магистр экономических наук*
(*БНТУ, г. Минск, Беларусь*)

Короткевич Л. М. – 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65,
Белорусский национальный технический университет, e-mail: lmk76@mail.ru

**Аннотация:** Предприятия машиностроительного комплекса Республики Беларусь могут оказаться в положении несостоятельности или временной неплатежеспособности. Для своевременного выявления проблем предлагается существующую методику оценки финансового состояния и платежеспособности субъектов хозяйствования Республики Беларусь дополнить показателями, характеризующими производственно-сбытовую деятельность. В качестве показателей предлагается использовать:1) индекс развития, позволяющий сопоставить результаты производственной и сбытовой деятельности предприятия и выявить наличие отклонений. По данному показателю предприятие может попасть в три зоны (роста, стабильности и спада); 2) среднюю загрузку производственных мощностей, позволяющую оценить уровень использования имеющегося потенциала предприятия.По результатам также выделяются три зоны. На основании предложенных показателей строится матрица выбора стратегии антикризисного управления.

**Ключевые слова:** Стратегия, антикризисное управление, диагностика, финансовая деятельность, производственная деятельность, критерии оценки, матрица

Машиностроение является важнейшей отраслью Беларуси с активным развитием сельскохозяйственного и транспортного направлений. В республике выпускается более 59 тыс. тракторов, 2 тыс. зерноуборочных комбайнов, 22 тыс. грузовых автомобилей, 2 тыс. автобусов в год. В 2013 году было произведено более 12,7 млрд долл. США продукции машиностроения [1].

Более 60% продукции машиностроения реализуется как на рынке стран СНГ, так и Дальнего зарубежья. Основными странами-потребителями являются Российская Федерация и Казахстан (около 73% экспорта).

В настоящее время большинство предприятий машиностроительного комплекса Республики Беларусь оказались в тяжелом финансовом положении. На данную ситуацию оказали влияние факторы как внешней, так и внутренней среды: высокая степень износа основных средств, высокая стоимость материальных ресурсов (материалоемкость более 60%), повышение уровня конкуренции на внешнем рынке, снижение уровня платежеспособности сельскохозяйственных предприятий и др.

Основные показатели деятельности предприятий машиностроения и металлообработки представлены в таблице 1 [2]

Таблица 1 – Основные показатели работы предприятий машиностроения и металлообработки Республики Беларусь за 2005 – 2012 гг.

| Показатель | Значение по годам | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
| Число предприятий, единиц | 2811 | 3034 | 3382 | 4701 | 5345 | 5947 | 5938 | 5938 |
| Объем промышленного производства, млрд.р. | 14001 | 18353 | 23424 | 30381 | 27387 | 36378 | 58566,4 | 92312 |
| Удельный вес продукции машиностроения и металлообработки в общем объеме промышленного производства, % | 22,4 | 23,8 | 24,5 | 23,2 | 21,5 | 22,0 | 23,0 | 16,0 |
| Среднесписочная численность работников промышленности, тыс. чел | 386 | 390 | 396 | 398 | 380 | 370 | 365 | 374 |
| Прибыль от реализации продукции, работ, услуг, млрд. р. | 1204 | 1810 | 2492 | 2650 | 2194 | 3155 | 5234 | 8432 |
| Рентабельность продаж, % | 8,6 | 10,1 | 10,7 | 9,2 | 8,6 | 9,1 | 16,4 | 12,3 |
| Снижение, повышение затрат на тыс.р. продукции, в % к предыдущему году | -0,9 | 0,7 | 2,2 | -2,1 | 3,8 | 1,8 | 1,9 | 2,1 |

Как видно из данных таблицы 1 динамика роста была нарушена по всем показателям в 2009 году в результате мирового экономического кризиса. Кроме того, наблюдалась неравномерная тенденция развития показателей относительной эффективности вследствие неоднородной динамики изменения затрат по отрасли, причем число предприятий отрасли значительно выросло.

К 2015 году ситуация на рынке машиностроения ухудшилась (уровень рентабельности продаж ниже уровня 2009 г.). Многие предприятия перешли на неполную рабочую неделю в связи со снижением объема производства и реализации продукции.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что многие организации машиностроения Республики Беларусь могут оказаться в положении несостоятельности или временной неплатежеспособности. Поэтому хорошо обоснованная стратегия антикризисного управления позволит вовремя распознать кризис и учитывая его особенность, снизить остроту последствий. Данные обстоятельства позволяют сделать вывод об актуальности выбранной темы исследования.

В настоящее время в основе оценки финансового состояния и платежеспособности субъектов хозяйствования Республики Беларусь используются:

1) Инструкция о порядке расчета коэффициентов платежеспособности и проведения анализа финансового состояния и платежеспособности субъектов хозяйствования, утвержденной Постановлением Министерства Финансов Республики Беларусь и Министерства экономики Республики Беларусь от 27 декабря 2011 г. № 140/206;

2) Постановления Совета Министров Республики Беларусь от 12 декабря 2011 г. № 1672 «Об определении критериев оценки платежеспособности субъектов хозяйствования».

Данные нормативные документы определяют порядок расчета и критерии коэффициентов платежеспособности: коэффициент текущей ликвидности, коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами, коэффициент обеспеченности долгосрочных обязательств активами.

На наш взгляд основным недостатком данной методики является анализ только результатов финансовой деятельности. Для своевременного выявления проблем предлагается существующую методику дополнить показателями, характеризующими производственно-сбытовую деятельность.

Предлагаемый алгоритм экспресс-диагностики производственно-сбытовой деятельности представлен на рисунке 1.

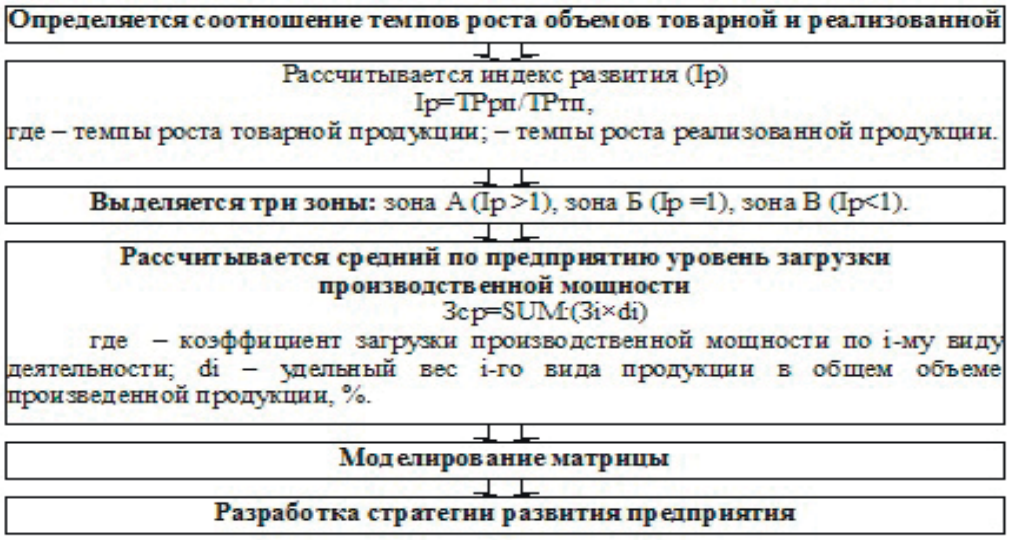



Рисунок 1 – Алгоритм экспресс-диагностики производственно-сбытовой деятельности машиностроительного предприятия

Индекс развития позволит сопоставить результаты производственной и сбытовой деятельности предприятия и выявить наличие отклонений. Средняя загрузка производственных мощностей позволит оценить уровень использования имеющегося потенциала предприятия.

Данная методика была апробирована на предприятиях, входящих в холдинг «БелавтоМАЗ».

Холдинг «БелавтоМАЗ» – белорусский государственный автомобилестроительный холдинг, один из крупнейших в СНГ производителей автомобильной техники. По состоянию на 01.01.2013г. в состав холдинга «БелавтоМАЗ» входит 9 предприятий из которых объектом исследования выступили:

1 Открытое акционерное общество «Минский автомобильный завод» (ОАО «МАЗ»);

2 Открытое акционерное общество «Осиповичский завод автомобильных агрегатов» (ОАО «ОЗАА»);

3 Открытое акционерное общество «Кузнечный завод тяжелых штамповок» (ОАО «КЗТШ»);

4 Общество с ограниченной ответственностью «Завод автомобильных прицепов и кузовов «МАЗ-Купава» (ООО «МАЗ-Купава»);

5 Открытое акционерное общество «Дзержинский экспериментально-механический завод» (ОАО «ДЭМЗ»).

Результаты расчетов индекса развития и среднего уровня загрузки производственной мощности объектов исследования представлены на рисунке 2.

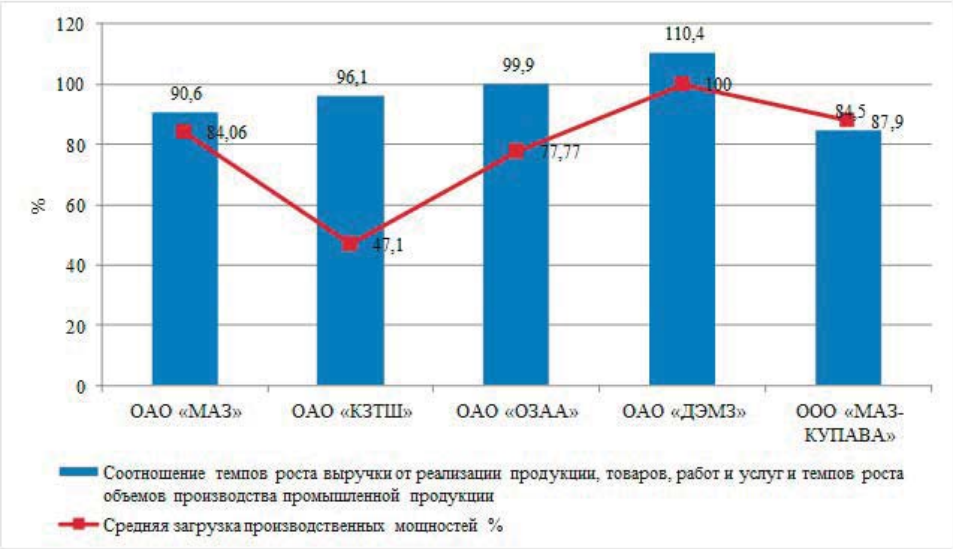



Рисунок 2 – Результаты расчетов индекса развития и среднего уровня загрузки производственной мощности объектов исследования

На основании ранее предложенных показателей можно построить матрицу выбора стратегии антикризисного управления (рисунок 3).

| | | Зона А | | | Зона Б | | | Зона С | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ТРтп<ТРрп (Iр>1) | | | ТРтп=ТРрп (Iр=1) | | | ТРтпТРрп (pI<1) | | |
| | | рост | const | спад | рост | const | спад | рост | const | спад |
| Загрузка производственных мощностей | 100-66% | Стабильное развитие предприятия **ОАО «ДЭМЗ»** | | | | | Устойчивое развитие предприятия **ОАО «МАЗ», ОАО «ОЗАА» ООО «МАЗ-Купава»** | | | |
| | 65-33% | Устойчивое развитие предприятия | | Коммерческий кризис **СОАО «КЗТШ»** | | | | | | |
| | 32-0% | Производственный кризис | | | | | Производственно-коммерческий кризис | | | |

Рисунок 3– Матрица выбора стратегии антикризисного управления для машиностроительных предприятий, входящих в Холдинг «БелавтоМАЗ»

Как видно из рисунка 3, выделяются пять зон. Охарактеризуем каждую из них:

- стабильное развитие предприятия – продукция предприятия реализуется, повышается уровень ее конкурентоспособности на рынке, запасы готовой продукции на складе соответствуют нормативу;

- устойчивоеразвитие предприятия– работу предприятия можно признать стабильной, однако появляются затруднения с реализацией продукции. Это может быть вызвано снижением уровня ее конкурентоспособности на рынке, появлением более сильного конкурента. Также такая динамика может свидетельствовать о не-

благоприятном влиянии факторов внешней среды;

- коммерческий кризис–предприятие испытывает трудности со сбытом своей продукции. Даже положительная динамика свидетельствует о неблагоприятной ситуации. Необходим тщательный анализ ассортимента выпускаемой продукции, конъюнктуры рынка;
- производственный кризис–предприятие находится в предкризисной ситуации, так как наращивает объемы нереализованной продукции на складе. Необходимо пересмотреть производственную программу с целью снижения объема производства или разработать ряд мероприятий по стимулированию сбыта;
- производственно-коммерческий кризис вне зависимости от динамики можно сделать вывод о неэффективности производственно-хозяйственной деятельности предприятия, в силу факторов как внешних, так и внутренних.

На основании зоны развития предприятия выбирается стратегия антикризисного управления.

Для ОАО «ДЭМЗ» можно предложить стратегию интенсивного роста. Основная цель предприятия – наращивание объема производства и реализации продукции.

Для ОАО «МАЗ», ОАО «ОЗАА», ООО «МАЗ-Купава» предлагается стратегия продвижения. Основная цель предприятия – выход на новые рынки и сохранение позиций на существующих. Разработка эффективной коммуникационной и распределительной политики предприятия.

Для СОАО «КЗТШ» предлагается стратегия диверсификации производства. Основная цель – оценка возможности производства новых инновационных видов продукции.

**Выводы:**

- с целью выбора стратегии антикризисного управления предлагается использовать матричный метод, который позволяет на основании темпов роста объемов товарной и реализованной продукции, а так же загрузки производственной мощности определить зону развития предприятия;
- апробация предложенного методического подхода показала, что данная методика выявляет дисбаланс между производством и реализацией продукции предприятия и помогает определить наиболее перспективные направления его развития.

## Список литературы:

1. Машиностроение/ [Электронный ресурс] - Режим доступа: // http: investinbelarus.by

2. Статистический сборник Республики Беларусь/ [Электронный ресурс] - Режим доступа: // http: belstat.gov.by

**DEVELOPMENT OF METHODS OF CRISIS MANAGEMENT STRATEGY SELECTION IN THE INDUSTRIAL ENTERPRISE.**

**Karatkevich L. M., C.E.c.** *( Economic), Associate Professor, e-mail: lmk76@mail.ru*
**Zelenkovskaya N.V., M.E.c** *(Economic), e-mail: zelennat@mail.ru*

National Technical University, 65, avenue Nezavisimosty, Minsk, 220013, Belarus

**Annotation.** In order to select the strategy of crisis management it is suggested to use matrix. Features of which are chosen: index of development and average capacity utilization.

**Keywords:** strategy, crisis management, diagnostics, financing activity, production activity, assessment criteria, matrix.

VII Международная научно-практическая конференция

«ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ» (ИнМаш-2015)

Сборник трудов

VII International scientific and practical conference

«INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING» (ISPCIME-2015)

Materials

23-25 сентября / September 2015 г.
Кемерово, Россия / Kemerovo, Russia

Труды конференции отпечатаны по оригиналам, представленными авторами

Ответственный редактор Блюменштейн В.Ю.
Технический редактор Останин О.А.
Компьютерная верстка Бородин Д.А.

Подписано в печать
Бумага белая писчая
Уч.-изд. л. 68,75
Заказ

Формат 60x84/8
Отпечатано на МФУ
Тираж 60 экз.

КузГТУ
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
ООО «ИНТ»
650000, г. Кемерово, пр-т Октябрьский, 78-160