VII Международная научно-практическая конференция

VII International scientific and practical conference

«ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ» (ИнМаш-2015)

«INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING» (ISPCIME-2015)



Сборник Materials трудов

23-25 сентября/September 2015 г.
Кемерово, Россия / Kemerovo, Russia

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
Новосибирский государственный технический университет
Бийский технологический институт
МИП Техмаш

ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ (ИнМаш-2015)

INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING (ISPCIME-2015)

VII Международная научно-практическая конференция

VII International scientific and practical conference

Сборник трудов

Materials

Конференция проходит при поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований

23-25 сентября / September 2015 г.
Кемерово, Россия / Kemerovo, Russia

УДК 330:621.0(05)
ББК У305.4-551

Инновации в машиностроении: сборник трудов VII Международной научно-практической конференция / под ред. В. Ю. Блюменштейна. – Кемерово : КузГТУ, 2015. – 567 с.

ISBN 978-5-906805-41-6

В сборнике представлены труды 7-ой Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении-2015», отражающие проблемы и перспективы развития инновационных технологий в машиностроении, методов диагностики, ремонта и восстановления ответственных деталей изделий на основе применения современных физических методов и средств, методов упрочнения материалов, нанесения многофункциональных покрытий и нанотехнологий в машиностроении, а также организации и менеджмента машиностроительных производств и механизмов взаимодействия промышленных предприятий и высшей школы.

Труды приводятся в авторской редакции. За содержание представленной информации ответственность несут авторы.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 15-38-10365/15 Г.

Организационный комитет конференции:
Блюменштейн В.Ю., д.т.н., профессор, КузГТУ (г. Кемерово, Россия)
Баканов А.А., к.т.н., директор Института информационных технологий, машиностроения и автотранспорта КузГТУ (г. Кемерово, Россия);
Беляев В.Н., к.т.н., доцент, БТИ АлтГТУ (г. Бийск, Россия);
Буялич Г.Д., д.т.н., профессор, (г. Кемерово, Россия);
Голофастова Н.Н., к.э.н., доцент, директор Института КузГТУ (г. Кемерово, Россия);
Клепцов А.А., к.т.н., доцент, зав. кафедрой КузГТУ (г. Кемерово, Россия);
Кречетов А.А., к.т.н., доцент, проректор КузГТУ (г. Кемерово, Россия);
Марков А.М., д.т.н., профессор, проректор АлтГТУ (г. Барнаул, Россия);
Овчаренко А.Г., д.т.н., профессор, декан БТИ АлтГТУ (г. Бийск, Россия);
Останин О.А., директор ООО «МИП Техмаш» (г. Кемерово, Россия);
Рахимянов Х.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой НГТУ (г. Новосибирск, Россия);
Смирнов А.Н., д.т.н., профессор, КузГТУ (г. Кемерово, Россия);
Тамаркин М.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ДГТУ (г. Ростов-на-Дону, Россия);
Татаркин Е.Ю., д.т.н., профессор, зав. кафедрой АлтГТУ (г. Барнаул, Россия);
Фирсов А.М., к.т.н., доцент, зав. кафедрой БТИ АлтГТУ (г. Бийск, Россия).

© Кузбасский государственный технический университет имени. Т.Ф. Горбачева, 2015
ISBN 978-5-906805-41-6
© Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2015
© Новосибирский государственный технический университет, 2015
© Бийский технологический институт, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Приветственное слово ректора КузГТУ 13
СЕКЦИЯ 1
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 14
Марков А. М., Маркова М. И., Дронова О. Б.
Методика квалиметрического анализа деталей при прогнозировании временных затрат на производство широкой номенклатуры изделий предприятия 14
Крылов Е. Г., Козловцева Н. В.
Моделирование компонентов инструментальных систем автоматизированных станков на основе стандартов IDEF 19
Николаев П. И., Зиновьев В. В., Стародубов А. Н.
Применение эвристических методов при выборе структур автоматизированных производственных систем 22
Смирнов В. В.
Математическое моделирование контактных явлений при механической обработке материалов 26
Полетаев В.А., Чичерин И.В.
Методология автоматизированного проектирования технологических процессов в условиях интегрированного машиностроительного производства 30

KuzSTU rector welcoming speech
SECTION 1
AUTOMATION OF DESIGN FOR MACHINEBUILDING PRODUCTION
Markov A. M., Markova M. I., Dronova O. B.
Methods of the qualimetric analysis details in predicting the time costs on production of a wide range of products of the enterprise
Krylov E. G., Kozlovtseva N. V.
Modeling intelligent machine tool-associated system's component based on IDEF methods
Nikolaev P. I., Zinovyev V. V., Starodubov A. N.
The use of heuristic methods for computer-aided manufacturing structure choise
Smirnov V. V.
Mathematical modeling of contact phenomena in machining
Poletaev V. A., Chicherin I. V.
Methodology of computer-aided design of technological processes for integrated production

СЕКЦИЯ 2
ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И СБОРКИ МАШИН 37
Афанасьев В. К., Самонь В. А., Попова М. В., Долгова С. В., Герцен В. В.
О создании новых легких деформируемых сплавов для космической техники 37
Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Сенчуров Е. В.
Технология магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей деталей машин 44
Бекренев Н. В., Злобина И. В.
Влияние ультразвука на топографию поверхности конструкционных материалов при их финишной обработке 48
Бекренев Н. В., Злобина И. В. , Петровский А. П.
Обоснование получения монодисперсных неметаллических порошков ультразвуковым дроблением агломератов 52
Белов Е. Б., Леонов С. Л.
Расчет установившихся автоколебаний для прогнозирования волнистости обработанной поверхности при точении металлов 56

SECTION 2
INNOVATIVE TECHNOLOGICAL PROCESSES OF THE MACHINE PARTS PRODUCTION AND ASSEMBLY
Afanasyev V. K., Samon V. A., Popova M. V., Dolgova S. V., Herzen V. V.
About creation of new easy deformable alloys for space equipment
Akulovich L. M., Sergeev L. E., Senchurov E. V.
The technology of magnetic-abrasive machining of flat surfaces of machine parts
Bekrenev N. V., Zlobina I. V.
Influence of ultrasound on topography of the surface of constructional materials at their finishing processing
Bekrenev N. V., Zlobina I. V., Petrovsky A. P.
Justification of receiving monodisperse nonmetallic powders ultrasonic crushing of agglomerates
Belov E. B., Leonov S. L.
Calculation of steady self-oscillations for forecasting of machined surface waviness at turning of metal

Белов А. Б., Леонов С. Л.
Прогнозирование геометрических параметров качества обработанных отверстий на многоцелевых токарно-фрезерных обрабатывающих центрах 61
Болкунов В. В., Григорьева Н. В., Решетникова О. П.
Повышение эффективности доводки шариков 66
Демин А. А., Титов И. А.
Влияние погрешностей размеров и формы сопрягаемых поверхностей на качество сборки прессовых соединений 69
Калистру В. А., Фирсов А. М.
Применение искусственных нейронных сетей при прогнозировании точности формы отверстий тонкостенных корпусных деталей 73
Гилета В. П., Безнедельный А. И., Асанов В. Б.
Износостойкость инструмента и качество поверхности при ультразвуковой упрочняющечистовой обработке 77
Хоменко В. А., Черданцев П. О., Черданцев А. О.
Анализ процесса торцового фрезерования на основе имитационного моделирования 82
Иконников А. М., Гребеньков Р. В., Силивакин В. С.
Исследование влияния магнитно-абразивной обработки на топографию поверхности 87
Клименко С. А.
Инновационные технологии точения деталей из труднообрабатываемых материалов инструментами, оснащенными сверхтвердыми композитами 91
Марченко А. Ю. , Кузнецова Н. Н., Серга Г. В.
Новые конструкции оборудования для упрочнения поверхностей деталей в машиностроительном производстве 95
Марков А. М., Черданцев П. О., Гайст С. В., Катаева С. А.
Экспериментальные исследования фрезерования композиционных материалов 99
Маркова М. И., Марков А. М., Счигёл Норберт
Модель оптимизации операция фрезерования поверхностей формообразующей оснастки 104
Медведев О.А., Григорьев В. Ф.
Оценка приемлемости техпроцессов мехобработки для достижения точности угловых размеров деталей 108
Панов А. А., Моисеенко К. Л.
Особенности применения селективной сборки при неидентичных законах рассеяния размеров звеньев 113
Рахимянов Х. М., Гаар Н. П., Журавлев А. И., Локтионов А. А.
Влияние скорости тонкоструйной плазменной резки на формирование точности кромок реза 116

Belov A. B., Leonov S. L.
Forecasting of geometrical parameters of quality of the processed openings on the multi-purpose turning and milling processing centers 61
Bolkunov V. V., Grigorieva N. V., Reshetnikova O. P.
Increase of efficiency of operational development of balls 66
Demin A. A., Titov I. A.
Effect of error of sizes and shapes of mating surfaces on the build quality press connection 69
Kalistru V. A., Firsov A. M.
Application of artificial neural networks in forecasting accuracy of a hole shape of thin-walled body parts 73
Gileta V. P., Beznedelnyy A. I., Asanov V. B.
Wear resistance of the tool and surface condition under ultrasonic reinforcing finishing process 77
Khomenko V. A., Cherdancev P. O., Cherdancev A. O.
Analyses of the face milling process based on the imitation modelling 82
Ikonnikov A. M., Grebenkov R. V., Silivakin V. S.
Study of the influence of magnetic-abrasive machining on surface topography 87
Klimenko S. A.
Innovative technologies of turning of hard-machinable material parts by tools with super-hard composites 91
Marchenko A. Yu., Kuznetsova N. N., Serga G. V.
New designs of the equipment for hardening of surfaces of details in machine-building production 95
Markov A. M., Cherdancev P. O., Gayst S. V., Kataeva S. A.
Experimental research of composite materials milling 99
Markov A. M., Markova M. I., Sczygiol N.
Optimization model of milling of surfaces of form-building equipment 104
Medvedev O. A., Grigoriev V. F.
Evaluation of the acceptability of technological processes of mechanical treatment to achieve precision angular dimensions of parts 108
Panov A. A., Moiseenko K. L.
Features of application of selective assembly with non-identical laws of scattering dimensions links 113
Rakhimyanov Kh. M., Gaar N. P., Zhuravlev A. I., Loktionov A. A.
Effect of speed of high-precision plasma cutting on the accuracy of cut edge formation 116

Рахимянов Х. М., Красильников Б. А., Рахимянов К. Х.
Технологические особенности обработки изделий, выполненных из аморфных и нанокристаллических сплавов 120
Рахимянов Х. М., Красильников Б. А., Василевская С. И.
Исследование анодного поведения меди в условиях электрохимической обработки при гидроструйной активации поверхности 126
Рахимянов Х. М., Красильников Б. А., Василевская С. И.
Особенности анодного растворения сплава ЖС6 в условиях электроалмазной обработки 131
Рахимянов Х. М., Рахимянов А. Х.
Технологические рекомендации по раскрою биметаллических композиций с использованием тонкоструйной плазменной резки 136
Рахимянов Х. М., Рахимянов К. Х., Семенова Ю. С., Еремина А. С., Товкач О. Л.
Роль ультразвукового поверхностного пластического деформирования в формировании поверхностного слоя после цементации и закалки в электролитной плазме 142
Рахимянов Х. М., Семенова Ю. С., Еремина А. С.
Влияние режимов ультразвукового пластического деформирования на геометрические параметры формируемого микрорельефа обрабатываемой поверхности 148
Ромашев А. Н., Марков А. М.
Анализ состояния вопросов мониторинга и диагностирования режущего инструмента в процессе обработки 153
Рыжиков И. Н., Нгуен К. Т.
Учет влияния расстройки параметров рабочих лопаток при сборке рабочих колес турбомашин 158
Солер Я. И., Нгуен В. Л.
Влияние контура плоских деталей из закаленной стали 30хгса на макрогеометрию при маятниковом шлифовании кругами различной пористости 162
Солер Я. И., Нгуен М. Т.
Повышение точности формы плоских деталей из стали 06Х14Н6Д2МВТ-Ш при шлифовании нитридборовыми кругами с применением нечеткой логики 166
Солер Я. И., Нгуен Ч. К.
Оценка режущих свойств кругов Norton из карбида кремния при маятниковом шлифовании алюминиевого сплава 1933Т2 по критерию макрогеометрии 171
Солер Я. И., Шустов А. И.
Влияние связки нитридборовых кругов высокой пористости на точность формы быстрорежущих пластин 175

Rakhimyanov Kh. M., Krasilnikov B. A., Rakhimyanov K. Kh.
Technological processing features products made from amorphous and nanocrystalline alloys 120
Rakhimyanov Kh. M., Krasilnikov B. A., Vasilevskaya S. I.
Investigation of the anode behaviour of copper under condition of electrochemical processing at hydrojet activation of the surface 126
Rakhimyanov Kh. M., Krasilnikov B. A., Vasilevskaya S. I.
Features of anode dissolution of the alloy of ZHS6 in the conditions of electrodiamond processing 131
Rakhimyanov Kh. M., Rakhimyanov A. Kh.
Technological recommendations for cutting bimetallic compositions using high-precision plasma cutting 136
Rakhimyanov Kh. M., Rakhimyanov K. Kh., Semenova Ju. S., Eremina A. S., Tovkach O. L.
The role of ultrasonic surface plastic deformation in the formation of the surface layer after the carburizing and hardening in plasma electrolyte 142
Rackhimyanov Kh. M., Semyonova Ju. S., Eryomina A. S.
Effect of ultrasonic plastic deformation modes on microrelief geometric parameters of machined surfaces 148
Romashev A. N., Markov A. M.
The analysis of the status of questions of monitoring and diagnosing of the cutting tool in processing 153
Ryzhikov I. N., Nguyen Q. T.
Accounting for the effects of mistuning of rotor blades in the assembly of gas turbine engines bladed disks 158
Soler Ya. I., Nguyen V. L.
Effect of the outline of plane parts from hardened steel 30chgsa on macrogeometry while pendulum grinding by different porous wheels 162
Soler Ya. I., Nguyen M. T.
Improving the form accuracy of flat parts from steel 06Cr14Ni6Cu2MoWTi-SH while grinding by nitride-boron wheels using fuzzy logic 166
Soler Ya. I., Nguyen Ch. K.
Assessment cutting properties wheels of silicon carbide in pendulum grinding aluminum alloy 1933T2 by macrogeometrycriterion 171
Soler Ya. I., Shustov A. I.
Shape accuracy analysis of couplant of high-porous cubic nitride boron wheels for high-speed steel plates 175

Солер Я. И., Стрелков А. Б., Репей Е. О.
Многокритериальная оптимизация стратегии плоского шлифования деталей из коррозионностойких сталей кругами из кубического нитрида бора 179
Пичхидзе С. Я., Таганова В. А.
Термооксидирование металлических заготовок 183
Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Казаков Д. В., Гребенкин А. Г.
Обеспечение надежности динамических методов ППД на примере центробежно-ротационной обработки 186
Татаркин Е. Ю., Фирсов А. М., Калистру В. А.
Совершенствование технологической подготовки групповой обработки базовых отверстий корпусных деталей 191
Татаркин Е. Ю., Иконников А. М., Шрайнер Т. А.
Автоматизация выбора инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей 196
Тихонов Ан. А., Тихонов Ал. А., Шляхов Н. С.
Сущность и технологические возможности гидроабразивной обработки 201
Вартанов М. В., Божкова Л. В.
Приближенная математическая модель роботизированной сборки профильных соединений 205
Ятло И. И., Буканова И. С.
Моделирование напряженно-деформированного состояния процесса дорнования отверстия в корпусе с одновременной запрессовкой втулки 209
Ятло И. И., Буканова И. С.
Моделирование напряженно-деформированного состояния процесса дорнования отверстия в корпусе с одновременной запрессовкой втулки 213

СЕКЦИЯ 3
НАНОТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ. УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ 220
Абабков Н. В., Петрова Е. Е.
Применение спектрально-акустического метода для контроля упрочненного поверхностного слоя металлических изделий 220
Абабков Н. В., Смирнов А. Н., Быкова Н. В.
Идентификация наноразмерной структуры по параметрам метода акустической структуроскопии 224

Soler Ya. I., Strelkov A. B., Repey E. O.
Multicriteria optimization of strategy of flate grinding with cubic nitride boron wheels for corrosion-resistant steel parts

Pichhidze S. Y., Taganova V. A.
Termooksidirovanie metal blanks

Tamarkin M. A., Tishchenko E. E., Kazakov D. V., Grebenkin A. G.
The reliability control of the surface plastic deformation (SPD) dynamic methods by way of example of the centrifugal rotary processing

Tatarnikov E. Yu., Firsov A.M., Kalistru V.A.
Design features of technological processes in terms of multiproduct manufacturing

Tatarkin E. Yu., Ikonnikov A. M., Schrayner T. A.
Automated selection tool for operations magnetic abrasive machining of complex surfaces

Tikhonov An. A., Tikhonov Al. A., Shlyakhov N. S.
The essence and technological possibilities of waterjet machining

Vartanov M. V., Bojkova L. V.
Approximate mathematical model of robotic assembly a profile connections

Jatlo I. I., Bukanova I. S.
Modelling is intense – the deformed condition of process of calibration of the opening in the case with the simultaneous press fitting of the plug

Jatlo I. I., Bukanova I. S.
Modelling is intense – the deformed condition of process of calibration of the opening in the case with the simultaneous press fitting of the plug

SECTION 3
NANOTECHNOLOGIES AND MATERIALS SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING. THE STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND FUNCTIONAL COVERINGS

Ababkov N. V., Petrova E. E.
The application of spectral-acoustic method of control for hardened surface layer of metal products

Ababkov N. V., Smirnov A. N., Bykova N. V.
Identification of nanoscale structures according to a parameters of acoustic structuroscopy method

Абабков Н. В., Смирнов А. Н., Завсеголов А. А.
Исследование металла эксплуатируемых и поврежденных гибов пароотводящих труб акустическими и магнитными методами 229
Ababkov N. V., Smirnov A. N., Zavsegolov A. A.
The study of operated and damaged bends metal of steam-deferent by acoustic and magnetic methods

Афанасьев В. К.
О современном развитии диаграммы Fe– C и его практическом применении 233
Afanasyev V. K.
About modern development of the chart Fe-C and its practical application

Беляев В. Н., Татаркин Е. Ю.
Технология отделочно-упрочняющей обработки с нанесением функционального покрытия 239
Belyaev V. N., Tatarkin E. Yu.
Technology rolling of details with forming function coating

Беляев В. Н., Козлюк А. Ю., Андреев А. С., Лобунец А. В.
Повышение эффективности проточного хромирования 243
Belyaev V. N., Kozlyuk. A. Yu., Andreev A. S., Lobunets A. V.
Increase of efficiency of the flowing chromium-plating process

Бердичевский Е. Г.
Инновационные технологические смазки в процессах горячей обработки металлов 246
Berdichevskiy E. G.
Innovative technological lubrical in hot metal working processes

Блюменштейн В. Ю.
Технологическая наследственность в машиностроении: от качества поверхностного слоя к механике наследования и эволюции структур 250
Blumenstein V. Yu.
Technological inheritance in mechanical engineering from the quality of the surface layer to the mechanics of inheritance and evolution of structures

Еремин Е. Н., Лосев А. С., Бородихин С. А., Маталасова А. Е.
Структура и свойства наплавленного металла Н13М5Х4ФСТЮ, легированного соединениями бора 255
Eremin E. N., Losev A. S., Borodikhin S. A., Matalasova A. E.
Structure and properties of deposited metal N13M5H4FSTYU doped with boron compounds

Шморгун В. Г., Слаутин О. В., Евстропов Д. А., Таубе А. О., Кулевич В. П.
Исследование износостойкости интерметаллидных покрытий систем медь-титан сформированных на поверхности медной подложки 260
Shmorgun V. G., Slautin O. V., Evstropov D. A., Taube A. O., Kylevich V. P.
Study of durability of intermetallic titanium-copper coatings formed on the surface of a copper substrate

Фыонг Ф. Д., Зайдес С. А.
Определение параметров поперечной обкатки цилиндрических деталей машин 264
Phuong Ph. D., Zaides S. A.
Determination of transverse burnishing parameters of cylindrical machine part

Габец Д. А., Каргин В. В., Чертовских Е. О., Марков А. М., Габец А. В.
Триботехнические свойства специального чугуна ЧМН-35М 268
Gabets D. A., Kargin V. V., Chertovskikh E. O., Markov A. M., Gabets A. V.
Tribological properties of special cast iron CHMN-35M

Зайдес С. А., Горбунов А. В.
Отделочно-упрочняющая обработка маложестких валов центробежным обкатыванием 274
Zaydes S. A. Gorbunov A. V.
The finishing-hardening treatment of non-rigid shafts with a centrifugal rolling

Коцур И. П., Рябинкина П. А., Градусов И. Н., Никулина А. А.
Структурные исследования соединений углеродистой и хромоникелевой сталей, полученных лазерной сваркой 280
Kotsur I. P., Ryabinkina P. A., Gradusov I. N., Nikulina A. A.
Structural investigation of carbon steel and chrome-nickel steel joints obtained by laser welding

Гуревич Л. М., Трыков Ю. П., Проничев Д. В., Трунов М. Д.
Зависимость НДС титано-алюминиевого композита с эллиптическими дефектами от толщины мягкой прослойки 284
Gurevich L. M., Trykov Yu. P., Pronichev D. V., Trunov M. D.
The impact of soft interlayer width on the stress-strain state of Ti-Al composite with elliptical hole

Гуцаленко Ю. Г.
Формирование структур повышенной функциональности в твердых сплавах и сталях электроразрядными технологиями спекания 289
Gutsalenko Yu. G.
Formation of structures of increased functionality in hard alloys and steels by sintering and grinding under electric discharge technologies

и шлифования
Иванов С. Г., Гурьев М. А., Иванова Т. Г., Гурьев А. М.
Исследование диффузии бора при одновременном многокомпонентном насыщении углеродистых и легированных сталей бором, хромом и титаном 294
Каченюк М. Н., Агафонова О. О.
Получение износостойкого композиционного материала на основе карбосилицида титана методом плазменно-искрового спекания 298
Кадочникова А. Р.
Регулирование выходных параметров подшипников качения путем учета технологического наследования 302
Хейфец М. Л., Васильев А. С., Клименко С. А., Любодраг Танович
Технологическое наследование параметров качества материала и поверхности детали 307
Хейфец М. Л.
Стружкообразование и формирование поверхностного слоя при лезвийной обработке 312
Кыонг Н. К., Зайдес С. А.
Подавление внеконтактной деформации в стесненных условиях локального нагружения 317
Леонтьев Л. Б., Шапкин Н. П., Леонтьев А. Л., Макаров В. Н.
Применение полимерсиликатных нанокомпозитов на основе вермикулита для формирования износостойких покрытий 321
Махалов М. С.
Наследственная модель формирования остаточных напряжений поверхностного слоя в процессах поверхностного пластического деформирования 325
Марусина В. И., Рахимянов Х. М.
Перспективы использования порошков карбида вольфрама, полученных в искровом разряде, для формирования покрытий 333
Минько Д. В., Белявин К. Е., Шелег В. К.
Импульсные электрофизические методы получения композиционных материалов и модифицированных структур 337
Девойно О. Г., Оковитый В. В.
Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий на основе диоксида циркония 342
Оришич А. М.
Лазерные инновационные технологии в машиностроении 347
Овчаренко А. Г., Козлюк А. Ю., Курепин М. О.
Оптимизация процесса комбинированной магнитно-импульсной обработки инструмента из твердых сплавов 351
Пантелеенко Е. Ф., Петришин Г. В.
Функциональные покрытия из дисперсных металлических отходов 355
Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Асташинский В. М., Оковитый В. В. 360

Ivanov S. G., Guriev M. A., Ivanova, T. G., Guriev A. M.
Study of boron diffusion with simultaneous multicomponent saturation carbon and alloy steel with boron, chromium and titanium 294
Kachenyuk M. N., Agafonova O. O.
Forming wear resistance composite material based on titanium silicon carbide by spark plasma sintering 298
Kadochnikova A. R.
Regulation of the output parameters of rolling bearings by taking into account the technological inheritance 302
Kheifetz M. L., Vasilyev A. S., Klimenko S. A., Lubodrag Tanović
Technological inheritance of quality parameters of the material and the work piece surface 307
Kheifetz M. L.
Chip formation and formation of surface layer at the edge cutting machining 312
Cuong N. C., Zaides S. A.
Suppression of outside contact deformation to the constrained conditions of the local loading 317
Leontev L. B., Shapkin N. P., Leontyev A. L., Makarov V. N.
Application nanocomposites based on vermiculite for formation wear-resistant coatings 321
Mahalov M. S.
The surface layer residual stress forming inherited model in surface plastic deformation process 325
Marusina V. I. Rakhimyanov Kh. M.
Prospects of using tungsten carbide powders obtained in the spark discharge for the formation of coatings 333
Minko D. V., Belyavin K. E., Sheleg V. K.
Pulse electrophysical methods of creating the composite materials and modified structures 337
Devoino O. G., Okovity V. V.
High energy plasma treatment coatings based on zirconium dioxide 342
Oreshich A. M.
Laser innovative technologies in mechanical engineering 347
Ovcharenko A. G., Kozlyuk A. Yu., Kurepin M. O.
Optimization of the combined process of magnetic-pulse treatment of carbide metal cutting tools 351
Panteleyenko E. F., Petrishin G. V.
Functional coatings made of dispersed metal wastes 355
Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. M., Okovity V. V. 360

Исследование процессов и оптимизация технологических параметров импульсно-плазменной обработки плазменных покрытий из материалов на основе многофункциональной оксидной керамики
Петренко К. П., Мирошин И. В.
Research of processes and optimization the technological parameters of pulse-plasma treatment plasma coatings of multifunctional materials based on oxide ceramics
Petrenko K. P., Miroshin I. V.

Аналитические исследования влияния формы программы нагружения на исчерпание запаса пластичности металла при ППД 364
Попова М. В., Прудников А. Н., Малюх М. А.
Analytical research of loading program shape on exhaustion of plasticity resource while surface plastic deforming
Popova M. V. Prudnikov A. N. Malyuh M. A.

Обработка расплава карбонатами щелочноземельных металлов как фактор влияния на тепловое расширение алюминия 368
Проничев Д. В., Гуревич Л. М., Трунов М. Д., Ястребов В. М.
Melt processing alkaline earth metal as a factor of influence on the thermal expansion of the aluminum
Pronichev D. V., Gurevich L. M., Trunov M. D., Yastrebov V. M.

Коррозионная стойкость композиционного материала алюминий-сталь 373
Прудников А. Н., Попова М. В., Прудников В. А.
Corrosion resistance of aluminium/steel laminated metal composites
Prudnikov A. N., Popova M. V., Prudnikov V. A.

Влияние термической обработки на электрические свойства низкоуглеродистой стали, изготовленной с использованием ДТЦО 377
Рахимянов Х. М., Красильников Б. А., Гаар Н. П., Локтионов А. А., Василевская С. И.
Influence of heat treatment on the electrical properties of low carbon steel, manufactured using DTCT
Rakhimyanov Kh. M., Krasilnikov B. A., Gaar N. P., Loktionov A. A., Vasilevskaya S. I.

Роль лазерного излучения в интенсификации электрохимического растворения стали 12Х18Н9Т 380
Рахимянов Х. М., Янпольский В. В., Иванова М. В.
Laser effect on an intensification of electrochemical dissolution of steel 12H18N9T
Rakhimyanov Kh. M., Yanpolskiy V. V., Ivanova M. V.

Электрохимическое растворение быстрорежущей стали Р12Ф3К10М2 386
Рахимянов Х. М., Янпольский В. В., Кадырбаев Р. М.
Electochemical dissolution speed steel R12F3K10M2
Rakhimyanov Kh. M., Yanpolskiy V. V., Kadyrbaev R. M.

Микротвердость и пористость гальванического покрытия при восстановлении работоспособности зеркальной поверхности гильз гидроцилиндров 390
Сараев Ю. Н., Горкунов Э. С., Голиков Н. И., Киселев А. С.
Microhardness and porosity of galvanic coating during the recovery of the mirror surface of hydraulic cylinder barrels
Saraev Y. N., Gorkunov E. S., Golikov N. I., Kiselev A. S.

Изыскание путей повышения эксплуатационной надежности металлоконструкций, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего севера 395
Радченко М. В., Шевцов Ю. О., Радченко Т. Б.
Finding ways to increase reliability steel maintained in the conditions of Siberia and the Far north
Radchenko M. V., Shevtsov Yu. O., Radchenko T. B.

Нанесение защитных покрытий на уплотнительные поверхности запорной арматуры электроннолучевой наплавкой в вакууме 405
Шморгун В. Г., Богданов А. И., Таубе А. О.
Production of protective coatings on sealing surfaces of valving fittings made by powder electron beam cladding process in vacuum
Shmorgun V. G., Bogdanov A. I., Taube A. O.

Влияние высокотемпературных нагревов на кинетику фазовых трансформаций в слоистых покрытиях на основе алюминидов никеля 409
Проничев Д. В., Гуревич Л. М., Трунов М. Д., Ястребов В. М.
Effect of high temperature heating on the kinetics of phase transformations in layered coatings based on nickel aluminide
Pronichev D. V., Gurevich L. M., Trunov M. D., Yastrebov V. M.

Исследование теплопроводности сваренного взрывом медно-алюминиевого композита 413
The impact of soft interlayer width on the stress-strain state of ti-al composite with ellipti-

Чёсов Ю. С., Зверев Е. А., Скиба В. Ю., Плотникова Н. В., Трегубчак П. В., Зарубин Д. Ю.
Износостойкость плазменных покрытий после индукционного нагрева 417
Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Никулина А.А., Вахрушев Н.В., Ваганов А.С., Бандюров И.В.
Специфика структуры износостойких плазменных покрытий из механических смесей на основе керамики 421

СЕКЦИЯ 4
ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 424

Абрамов А. А.
Компьютерное моделирование процесса формообразования осесимметричных ступенчатых деталей методом поперечно-клиновой прокатки 424
Белый А. Н., Белявин К. Е., Леванцевич М. А.
Исследование влияния отжига на адгезионную прочность покрытий, сформированных деформационным плакированием гибким инструментом 429
Зайдес С. А., Фам Д. Ф.
Определение условий поперечной обкатки при поверхностном пластическом деформировании 433
Герман С. В., Поксеваткин М. И., Басова Е. М., Дунаев К. Ю.
Формирование составной стержневой детали с полостью в утолщении из сборной заготовки 438
Герман С. В., Поксеваткин М. И., Дунаев К. Ю., Басова Е. М.
Алгоритмизация процесса формирования стержневой детали с полостью в утолщении 440
Кожевникова Г. В.
Комбинированный процесс поперечно-клиновой прокатки и штамповки 443
Кожевникова Г. В.
Особенности теплой поперечно-клиновой прокатки 447
Крутилин А. Н., Гуминский Ю. Ю.
Влияние вакуума на свойства жидкостекольных смесей 451
Ольховик Е. О.
Топологическая оптимизация конструкции корпуса литой запорной арматуры 456
Смирнов А. Н., Князьков В. Л., Петрова Е. Е., Назаров О. С.
Исследование перспективных способов замены хромированных покрытий на напыленные детонационным способом, модифицированных наноразмерными частицами Al2O3 461

cal hole
Chesov Yu.S., Zverev E. A., Skeeba V. Yu., Plotnikova N. V., Tregubchak P. V., Zarubin D. Yu.
Wear-resistance of plasma-sprayed coatings after induction heating
Chesov Yu. S., Zverev E. A., Nikulina A. A., Vakhrushev N. V., Vaganov A. S., Bandyurov I. V.
Structural specificity of wear-resistant plasma coatings of mechanical mixtures based on ceramic

SECTION 4
PROGRESSIVE TECHNOLOGICAL PROCESSES OF PROCURING PRODUCTION (METALS FORMING, WELDING, AND FOUNDRY PRODUCTION)
Abramov A. A.
Computer simulation of forming of axisymmetric multidiameter parts by cross-wedge rolling method
Bely A. N., Belyavin K. E., Levantsevich M. A.
Investigating the annealing influence on adhesive strength for the coverings generated by deformational cladding with flexible tool
Zaides C. A., Pham D. P.
Determination of transverse burnishing conditions under surface plastic deformations
German S. V., Poksevatkin M. I., Basova E. M., Dunaev K. Y.
Formation of a compound rod detail with a cavity in a thickening from modular preparation
German S. V., Poksevatkin M. I., Dunaev K. Y., Basova E. M.
Algorithmization process of forming a core part with a cavity in the thickening
Kozhevnikova G. V.
Combined Process Of Cross-Wedge Rolling And Stamping
Kozhevnikova G. V.
Features warm cross wedge rolling
Krutilin A. N., Huminski Yu. Yu.
Influence of vacuum on the properties of casting mixtures with sodium silicate
Ol'hovik E. O.
Topological optimization of hull construction of stop valves
Smirnov A. N., Knjaz'kov V. L., Petrova E. E., Nazarov O. S.
Research of perspective ways to replace chrome coatings with detonation spraying method modified with nanosized particles Al2O3

Проскуряков Н.Е., Володин А. В., Лай Данг Занг
Расчет энергоэффективности процессов электромагнитной штамповки плоских заготовок 465

Щукин В. Я.
Поперечно-клиновая прокатка зубков горнодобывающих комбайнов 469

Щукин В. Я.
Сварка в процессе поперечно-клиновой прокатки 473

СЕКЦИЯ 5
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ 477

Цхангхионг Сун
Симбиотические взаимоотношения между Китаем и Россией в области инноваций и развития 477

Кузнецова Н. Н., Марченко А. Ю., Серга Г. В.
Реализация современных образовательных технологий в учебном процессе графической подготовки специалистов в области машиностроения 481

Ситников А. А., Бородин В. А., Маркова М. И., Розина Г. А.
Создание машиностроительных учебно-производственных центров (на материалах АлтГТУ) 485

Максюкова С. Б., Трухманов Д. С.
Целостная система образования, как начало и гарант модернизации страны 489

Полетаев В.А., Чичерин И.В.
Управление качеством подготовки специалистов в области машиностроения 493

СЕКЦИЯ 6
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ, МЕТОДЫ РАСЧЕТА, ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ 502

Болкунов В. В., Мирошкин А. Г., Злобина И. В.
Повышение достоверности проверки допусков игольчатых подшипников без внутреннего кольца до их монтажа 502

Габайдулин Д. Ю., Гречнева М. В.
Проблема коррозионного растрескивания в автоклавах гидротермального синтеза кристаллов кварца 504

Горбунов В. П., Григорьев В. Ф.
Оценка влияния тепловых деформаций многоцелевого станка на показатели точности 508

Мозговой Н. И., Мозговая Я. Г., Пашкова Е. А.
Экспериментальные исследования внутренних дефектов пластичных материалов методом неразрушающего контроля 512

Proskuryakov N. E., Volodin A. V., Dang Lai Zhang
Calculation of energy efficiency of processes of electromagnetic stamping of flat blanks

Shchukin V. Ya.
Cross-wedge rolling of cutters for mining combines

Shchukin V. Ya.
Welding during cross-wedge rolling

SECTION 5
UPGRADING OF EDUCATION IN TERMS OF MECHANICAL ENGINEERING

Changxiong Sun
Symbiotic cooperation of innovation and development between China and Russia

Kuznetsova N. N., Marchenko A. Yu., Serga G. V.
Realization of the modern educational technologies in the learning process of graphics specialists training in the mechanical engineering sphere

Sitnikov A. A., Borodin V. A., Markova M. I., Rozina G. A.
Development of production-and-training centre for machine building (based on AltSTU)

Maksyukova S. B., Trukhmanov D. S.
Holistic education system as the beginning of the country's modernization and its guarantee

Poletaev V. A., Chicherin I. V.
Quality management training of engineering

SECTION 6
PROCESSING EQUIPMENT OF MACHINE-BUILDING PRODUCTIONS: NEW DESIGNS, CALCULATION METHODS, OPERATING EXPERIENCE

Bolkunov V. V., Miroshkin A. G., Zlobina I. V.
Increase of reliability of verification of admissions of needle bearings without internal ring before their installation

Gabaydulin D. Y., Grechneva M. V.
Problem of stress corrosion cracking in gydrotermal vessels for the synthesis of quartz crystals

Gorbunov V. P., Grigoriev V. F.
Evaluation of the effect of machining centers thermal deformation on accuracy figures

Mozgovoy N. I., Mozgovaya Y. G., Pashkova E. A.
Experimental studies of internal defects of plastic materials by non-destructive testing

Приходько А. А., Смелягин А. И.
Определение момента сопротивления среды на рабочем органе возвратно-вращательного перемешивающего устройства 516

Ромашев А. Н.
Технологические и функциональные приводные устройства на основе передач со свободными телами качения 520
Ситников А. А., Макарова Н. А., Камышов Ю. Н.
Оптимизация геометрии рабочих органов дисмембратора при помощи нейронной сети 523
Смелягин А. И.
Современные аксиомы и следствия из них для исследования динамики машин 526
Трухманов Д. С.
Экспериментальные исследования характеристик тензорезисторных датчиков на гибкой подложке с чувствительным элементом в виде сети из углеродных нанотрубок 530
Захаров О. В.
Расчет валковой системы станка для суперфиниширования шаров подшипников 535

СЕКЦИЯ 7
УГОЛЬНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ 538
Курленя М. В., Смоляницкий Б. Н.
Сибирская школа машиноведения и её вклад в развитие горнодобывающей промышленности 538
Маметьев Л. Е., Хорешок А. А., Борисов А. Ю.
Нагруженность дискового инструмента при разрушении межкорончатого целика стрелой проходческого комбайна 543
Маметьев Л. Е., Любимов О. В., Дрозденко Ю. В.
Совершенствование конструкции опор инструмента бурошнековых машин 548

СЕКЦИЯ 8
ЭКОНОМИКА, МЕНЕДЖМЕНТ И ОРГАНИЗАЦИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 553
Асканова О. В.
Российское машиностроение: тарифные барьеры развития 553
Карпенко А. В.
Влияние интеграционных процессов на развитие экономического потенциала машиностроительного комплекса стран таможенного союза 558
Короткевич Л. М., Зеленковская Н. В.
Разработка методики выбора стратегии антикризисного управления промышленным предприятием 563

Prikhod'ko A. A., Smelyagin A. I.
Determination of impeller resistant moment in reciprocating-rotational stirred tank

Romashev A. N.
Technological and functional actuating units on the basis of transmissions with the free rolling bodies
Sitnikov A. A., Makarova N. A., Kamyshov Yu. N.
Neural network optimization of dismembrator's working bodies' geometry
Smelyagin A. I.
The axioms and consequences for machines dynamics research
Trukhmanov D. S.
Experimental research of characteristics of strain gauge sensors on flexible substrates with sensitive elements in the form of a network of carbon nanotubes
Zakharov O. V.
Calculation roll system of machine tolls for superfinishing of ball bearings

SECTION 7
COAL ENGINEERING SCIENCE
Kurlenya M. V., Smolyanitsky B. N.
Siberian school of machine science and its contribution to the advancement in mining industry
Mametyev L. E., Khoreshok A. A., Borisov A. Yu.
Loading of the disk tool in the destruction of the pillar between the crowns by the boom roadheaders
Mametyev L. E., Lyubimov O. V., Drozdenko Y. V.
Improvement of the structure of auger tool's supports

SECTION 8
ECONOMY, MANAGEMENT AND ARRANGEMENT OF MACHINE-BUILDING PRODUCTION
Askanova O. V.
Russian mechanical engineering: tariff development barrier
Karpenko A. V.
The influence of integration processes on the development of the economic potential of machine building complex of the member states of the customs union
Karatkevich L. M., Zelenkovskaya N. V.
Development of methods of crisis management strategy selection in the industrial enterprise

Уважаемые коллеги!



Рад приветствовать Вас на VII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении», посвященной 65-летию Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева.

Основой индустриального потенциала экономики любой страны с полным основанием можно считать машиностроение. Опережающее наполнение ключевых отраслей промышленности современнейшим оборудованием и технологиями, является основным источником инновационного развития регионов, приводящего к экономическому росту страны в целом. Повышается результативность, производительность, культура и безопасность общественного труда, растет благосостояния населения.

Статус машиностроительной отрасли, как основы индустриального потенциала страны, вместе с тем подразумевает опережающее развитие машиностроения по отношению к тем отраслям, которые служат местом приложения продукции его деятельности. Фактически машиностроение создает ту техническую базу, которая определяет будущее практически всех отраслей промышленности.

В Кузбассе основной отраслью, формирующей бюджет и имеющей первостепенное значение, является угольная промышленность, включающая совокупность горных производств, образующих её инфраструктуру: шахты, разрезы, обогатительные фабрики, научные и проектные организации, прочие вспомогательные производства.

Если до 90-х годов прошлого века механизация добычи угля шла по пути развития и оснащения угледобывающих и обогатительных предприятий исключительно продукцией отечественного машиностроения, то в настоящее время в отрасли сформировалась жесткая зависимость от поставок импортной продукции и технологий.

Ввиду сложной политической ситуации в мире, реализация программ по импортозамещению становится для нашей промышленности крайне актуальной.

В главной для Кузбасса отрасли – угольной, по разным оценкам, доля импортного оборудования составляет около 80-90%.

В сложившихся непростых международных условиях становится очевидным актуальность импортозамещения в стратегических отраслях экономики, особенно в сфере наукоемких технологий. Обладая существенным потенциалом в таких сферах, как угольная промышленность, металлургия, машиностроение, химическая промышленность, Кемеровская область способна в ближайшей перспективе обеспечить стабильное развитие региональных производств и разработок. И здесь, необходимо отметить, что данное развитие немыслимо без участия научного сообщества, создающего новые наукоемкие технологии.

Дорогие друзья!

Убежден, что проведение международной конференции такого уровня на площадке нашего университета, безусловно, будет способствовать дальнейшему укреплению, модернизации и эффективности функционирования машиностроительного комплекса в экономике региона.

От всей души желаю участникам конференции, здоровья, благополучия и успехов на нелегкой ниве научно-педагогической деятельности, во благо экономического и социального развития России.

Ректор КузГТУ В.А. Ковалев

УДК 629.932

МЕТОДИКА КВАЛИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВРЕМЕННЫХ ЗАТРАТ НА ПРОИЗВОДСТВО ШИРОКОЙ НОМЕНКЛАТУРЫ ИЗДЕЛИЙ ПРЕДПРИЯТИЯ

А. М. МАРКОВ, доктор техн. наук., профессор,
М. И. МАРКОВА, кандидат. техн. наук, доцент,
О. Б. ДРОНОВА, кандидат экон. наук, доцент
(АлтГТУ, г.Барнаул, Россия)

Дронова О.Б. - 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
suholga.08@mail.ru

Аннотация: В условиях внедрения нового изделия и отсутствия полностью разработанной технологической документации вызывает сложность расчет трудоемкости изготовления изделия. В этом случае используются способы прогнозирования затрат. Одним из таких является методика укрупненного расчета трудоемкости на основе квалиметрического анализа деталей.

На основе анализа сложности геометрической формы, массы, материала, шероховатости поверхности, структуры и особенностей технологических операций деталей типа валов обоснована возможность применения предлагаемого метода квалиметрии для прогнозирования трудоемкости изготовления нового изделия в условиях мелкосерийного и единичного производства. Предварительный расчет соотношения расчетной трудоемкости по общемашиностроительным нормативам к трудоемкости, рассчитанной на основе квалиметрического подхода показал расхождение в 1,12 раза.

Ключевые слова: детали типа валов, трудоемкость изделий, способы прогнозирования затрат, квалиметрический анализ деталей, квалиметрический показатель.

Введение

Прогноз временных затрат на производство номенклатуры изделий предприятия в условиях быстрой сменяемости продукции машиностроения необходим и позволяет ему эффективно и обоснованно перераспределять свои ресурсы. Особенно значимой становится роль прогнозирования в ситуации внедрения нового изделия. На этом этапе для различных служб предприятия возникает существенное множество задач, которые необходимо выполнить с минимальными потерями времени. В связи с этим, развитие методов обоснованного прогнозирования временных затрат на изготовление нового изделия, является весьма актуальным. Все это напрямую влияет на эффективность функционирования производственных систем машиностроения и затрагивает не только вопросы нормирования, но и дает возможность повысить эффективность решения задач управления производственными ресурсами.

При всем многообразии задач современного нормирования на машиностроительных предприятиях отдельной проблемой является определение так называемой прогнозной трудоемкости изготовления изделий [1,2,4]. Решение целого ряда задач планирования производства либо вообще невозможно, либо некорректно без учета данного показателя.

Как известно, трудоемкость продукции представляет собой сумму затрат труда на изготовление единицы продукции. Для определения затрат труда разработаны методы нормирования, которые можно разделить на две группы: технически обоснованные и опытно-статистические. К технически обоснованным нормам отнесены расчетные нормы.

Объектами комплексного обоснования норм затрат труда являются: технологический процесс, режим работы оборудования, уровень затрат труда.

В условиях единичного, мелкосерийного, экспериментального производства, а также на ранних стадиях проектирования изделий применение дифференцированных расчетных методов определения технологической трудоемкости затруднено из-за отсутствия полностью разработанной технологической документации. Поэтому в этих условиях используют укрупненные расчетные методы определения трудоемкости [3,5].

В данной работе решена задача прогнозирования временных затрат на изготовление изделий машиностроения с использованием методики укрупненного расчета трудоемкости на основе квалиметрического анализа деталей.

Теория

Укрупненные методы определения трудоемкости базируются на выявлении общей тенден-

ции изменения величины трудоемкости изготовления в зависимости от изменения значений отдельных факторов, характеризующих её конструктивные особенности и условия производства [3,5].

На величину трудоемкости влияют разнообразные факторы, характеризующие конструктивно-технологические особенности изделий и организационно-технические факторы производства, отраженные в общем квалиметрическом показателе изделия. Сущность общего квалиметрического показателя раскрыта в отраслевом руководящем материале [3].

Методику определения прогнозной трудоемкости изделий на основе квалиметрического анализа деталей предлагается апробировать на примере деталей- тел вращения.

Трудоемкость изготовления детали зависит от общего квалиметрического показателя детали, в квалиметрических, нормативной удельной трудоемкости и нормативных коэффициентов соотношения трудоемкости по видам выполняемых технологических операций (рисунок 1).



Рисунок 1 – Составляющие трудоемкости детали

Рассмотрим этапы методики квалиметрического анализа деталей.

1 Этап. Присвоение кода детали по классификатору ЕСКД

При создании этого классификатора его создателями было проанализировано огромное количество выпускаемых деталей и узлов и на основании этого анализа были выделены основные характерные классификационные признаки. Пример присвоения кода детали телу вращения по классификатору ЕСКД представлен на рисунке 2.

2 Этап. Расчет общего квалиметрического показателя изделия, в квалиметрических.

Общий квалиметрический показатель включает в себя частные квалиметрические показатели геометрической формы детали; массы детали; материала детали; шероховатости поверхности детали; технологических особенностей детали [3].

Квалиметрический показатель геометрической формы детали рассчитывается в зависимости от количества размеров, проставленных на чертеже детали и уровня симметричности геометрической формы детали, определяемой таблично [3].

Квалиметрический показатель массы детали и шероховатости поверхности определяются по зависимостям от массы детали и самого низкого параметра шероховатости [3].

3 Этап. Нормативная удельная трудоемкость определяется по таблицам в зависимости от вида заготовки (таблица 1).

4 этап. Нормативные коэффициенты соотношения трудоемкости по видам выполняемых технологических операций определяются таблично (таблица 2).

Предварительные расчеты трудоемкости необходимы для того, чтобы определить коэффициент соотношения расчетной трудоемкости по общемашиностроительным нормативам ($T_{о.н.}$) к трудоемкости, рассчитанной на основе квалиметрического подхода ($T_{к.п.}$):

$$\eta_T = \frac{\sum T_{o.н.}}{T_{к.п.}}. \quad (1)$$

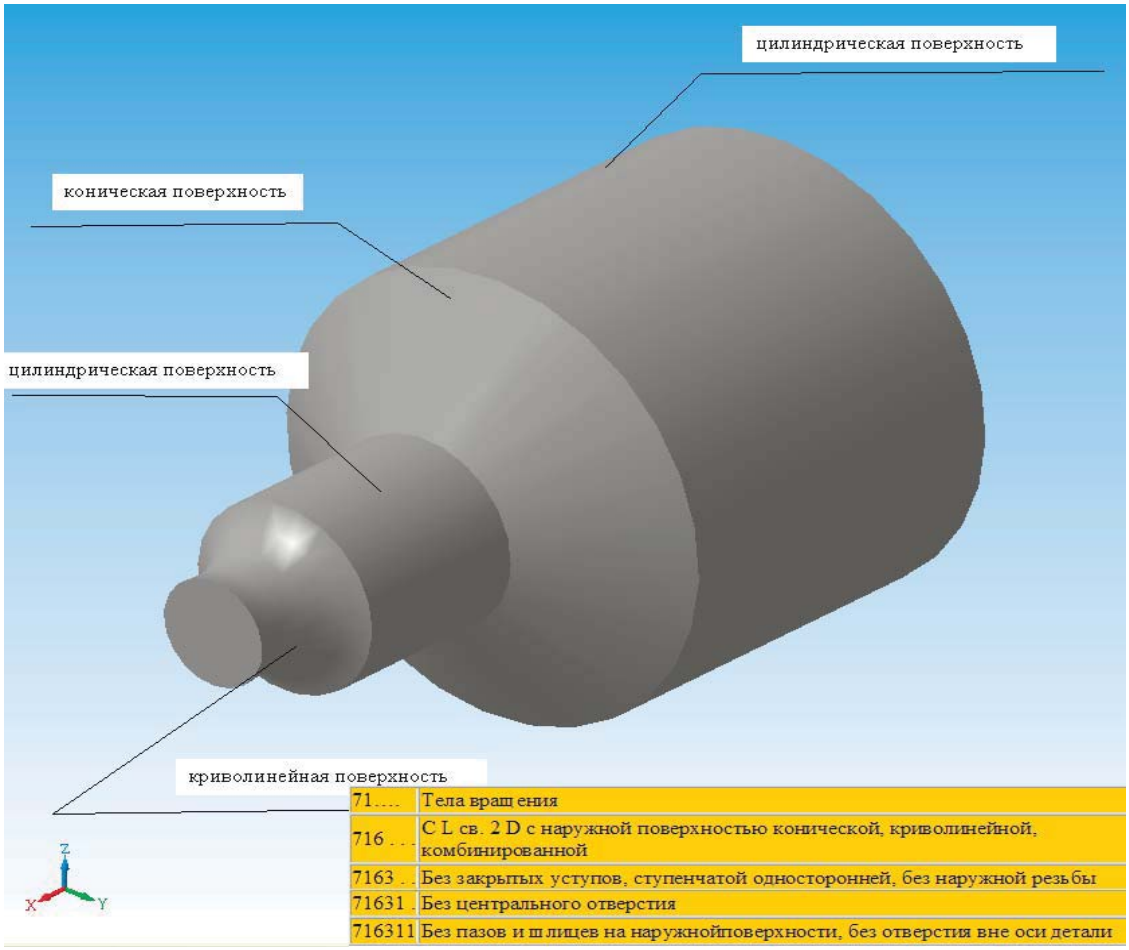


Рисунок 2 - Присвоение кода детали по классификатору ЕСКД

Таблица 1 – Нормативы удельной трудоемкости изготовления деталей в условиях экспериментального производства [3]

Код по классификатору ЕСКД	Удельная трудоемкость, нормо-часы на одну квашт. при изготовлении из				
	проката	трубы	поковки штамповки	отливки	листового проката
……					
711110	3,0	1,89	2,85	2,80	3,33
711210	0,86	0,54	0,78	0,72	0,96
713110 713210	0,40	0,25	0,37	0,34	0,45
711120	4,0	2,5	3,5	3,40	4,44
…….	1,14	0,71	1,04	0,76	1,27
711190 711290	0,54	0,33	0,49	0,36	0,6
711310	3,60	2,25	2,90	2,80	-
711510	1,03	0,64	0,94	0,86	-
716311	0,48	0,30	0,44	0,40	-
…….					

Таблица 2 - Значения нормативных коэффициентов по видам технологических операций [3]

Код по классификатору ЕСКД	Виды технологических операций					
	отрезная	токарная	фрезерная	сверлильная	расточная	шлифивальная
……						
711110-711700	0,04	0,41	0,05	0,10	0,18	0,07
712110-712700	0,04	0,41	0,05	0,10	0,18	0,07
713100-713700	0,04	0,41	0,05	0,10	0,18	0,07
714100-714700	0,04	0,41	0,05	0,10	0,18	0,07
715100-716700	0,02	0,50	0,11	0,03	0,03	0,15

Результаты и обсуждение

Методика определения прогнозной трудоемкости изделий на основе квалиметрического анализа деталей прошла апробацию на примере деталей типа валов (таблица 3).

Полученные коэффициенты убеждают в возможности применения предлагаемого метода квалиметрии для прогнозирования трудоемкости изготовления нового изделия в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Выводы

Установлено, что на величину трудоемкости влияют разнообразные факторы, характеризующие конструктивно-технологические особенности изделий и организационно-технические факторы производства, отраженные в общем квалиметрическом показателе изделия.

Методика определения прогнозной трудоемкости изделий на основе квалиметрического анализа деталей прошла апробацию на примере деталей типа валов.

В дальнейшем в рамках работы над магистерской диссертацией планируется вывести коэффициент для приведения трудоемкости по общемашиностроительным нормативам к трудоемкости, рассчитанной на основе квалиметрического подхода; разработать программное обеспечение, которое позволит прогнозировать трудоемкость изготовления изделий в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Таблица 3 – Сводные данные трудоемкости деталей типа валов

Профессия	Трудоемкость		Коэффициент
	$T_{о.н.}$	$T_{к.п.}$	η_T
Токари	988	869	1,14
Фрезеровщики	792	685	1,16
Шлифовщики	636	598	1,06
Итого по участку	2416	2152	1,12

Список литературы

1. *Бычин В.Б.* Нормирование труда. Учебник / В.Б. Бычин, С.В. Малинин. – М.: Экзамен, 2003.–318 с.

2. *Марков А. М.* Определение прогнозной трудоемкости изделий на основе квалиметрического анализа деталей / А. М. Марков, М.И. Маркова, О.Б. Дронова // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – №2.–с. 126–131.

3. *Перевощиков Ю.С.* Отраслевой руководящий материал. Методика укрупненного расчета трудоемкости на основе квалиметрического анализа деталей, получаемых обработкой резанием в цехах и производствах, работающих в условиях полного хозрасчета.– Ижевск, 1988.

4. *Скляревская В. А.* Организация, нормирование и оплата труда на предприятии. Учебник/ В.А. Скляревская. – М.: Дашков и К, 2012. – 512 с.

5.*Якимович Б.А.* Методы укрупненного нормирования в машиностроении и перспективы получения прогнозной трудоемкости / Б.Я. Якимович, А.И. Коршунов // Информатика – машиностроение.–1996.–№3.– с.34–37.

METHODS OF THE QUALIMETRIC ANALYSIS DETAILS IN PREDICTING THE TIME COSTS ON PRODUCTION OF A WIDE RANGE OF PRODUCTS OF THE ENTERPRISE

Markov A. M., D.Sc.,(Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

Markova M. I., C.Sc.,((Engineering), Associate Professor, e-mail: margarita-markova@inbox.ru

Dronova O. B., C.Sc.,(Economic), Associate Professor, e-mail: suholga.08@mail.ru

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenin prospect, Barnaul, Aitai region, 656038, Russian Federation

Abstract: The introduction of new products is connected with labor costs calculation of manufacturing products. When there is no fully developed technological documentation is using methods of costs forecasting. The methodology of labor costs calculating of the enlarged is based on the qualimetric analysis details.

The complexity of the geometric shape, mass, material, surface roughness, structure and characteristics of technological operations analysis of details such as shafts shows the method of costs forecasting is prove in a small batch and unit production. The ratio of labor costs calculating based on Engineering industry standards and on the qualimetric analysis details is 1,12 noun.

Keywords: details such as shafts, labor costs, methods costing, qualimetric analysis details, qualimetric index

УДК 621.91.02

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТАНКОВ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТОВ IDEF

Е. Г. КРЫЛОВ[1], *канд. техн. наук, доцент*,
Н. В. КОЗЛОВЦЕВА[2], *аспирант*
([1]*ВолгГТУ, г. Волгоград, РФ*, [2]*МГТУ «Станкин», г. Москва, РФ*)

Крылов Е. Г. – 400005, г. Волгоград, пр-т им. В. И. Ленина, 28,
ФГБОУ ВПО Волгоградский государственный технический университет,
e-mail: app@vstu.ru

Аннотация: В статье приведены особенности моделирования деятельности служб и систем машиностроительного предприятия. Описаны основные положения IDEF-моделирования. Показано, что основу методологии IDEF составляет графический язык моделирования систем, позволяющий строго и наглядно описать структуру и порядок взаимодействия подсистем предприятия различного уровня. Даны основные характеристики системы инструментального обеспечения как компонента автоматизированного станочного оборудования, влияющего на гибкость и надежность обработки изделий. Установлено, что использование количественных характеристик при моделировании позволяет выявить оптимальные структурно-компоновочные решения инструментальных систем, оценить качество их эксплуатации, определить источники потерь времени и материальных ресурсов.

Ключевые слова: моделирование, информационная модель, графический язык, система инструментального обеспечения, автоматизированный станок.

Моделирование деятельности машиностроительного предприятия необходимо для анализа его функционирования и последующего поиска путей совершенствования и развития. Основным требованием к моделированию при автоматизации производства является наличие целостного подхода к деятельности предприятия, при котором увязываются и согласовываются виды его деятельности и соответственно виды моделей [1]. Для моделирования деятельности служб, цехов, отделов предприятий широко используются методология IDEF. Применение специализированных инструментов моделирования открывает новые возможности автоматизированных систем технологической подготовки производства и позволяет:

– повысить качество проектирования технологических процессов;

– сократить сроки подготовки и оптимизации технологических маршрутов обработки, сборки и контроля изделий;

– создать единую автоматизированную систему проектной документации.

Особенностями методологии IDEF, позволяющими выявить и устранить проблемные места в деятельности служб и цехов предприятия, являются:

– использование различных инструментов анализа моделей в рамках общепринятой терминологии процессов моделирования;

– упрощение разработки технических систем за счет применения стандартного подхода (типовых графических символов и диаграмм).

В России для описания методологии IDEF служит руководящий документ, составленный научно-исследовательским Центром CALS – технологий «Прикладная Логистика» [2].

Общая методология IDEF состоит из нескольких частных методологий моделирования, основанных на графическом представлении компонентов и связей систем. К настоящему времени наибольшее распространение имеют нотации IDEF0 и IDEF1 (IDEF1X). Основу методологии IDEF0 составляет графический язык описания (моделирования) систем, обладающий следующими свойствами:

– способностью наглядно представлять широкий спектр производственных, технологических, организационных и других процессов и операций предприятия на любом уровне детализации;

– служит средством «информационного общения» большого числа различных технических специалистов (системных аналитиков, разработчиков и персонала) и рабочих групп занятых в одном проекте в процессе обсуждения, рецензирования и утверждения результатов;

– возможностью генерироваться рядом инструментальных средств машинной графики и взаимодействовать с типовыми программными продуктами.

Сравнительный анализ различных методологий показал, что IDEF0 отличается простотой в использовании и строгой регламентацией при создании диаграмм, что позволяет лучше реализовывать проект по анализу и разработке тех-

нологических процессов предприятия с помощью именно этой методологии [3]. Перечисленные преимущества предопределили выбор IDEF0 в качестве средства анализа и синтеза компонентов СИО автоматизированных станков.

В автоматизированном обрабатывающем производстве инструментальное обеспечение представляет собой единую систему, целью которой является максимально возможное использование инструментальных ресурсов для бесперебойного снабжения инструментами станков, функционирующих как отдельно, так и в составе ГПС. Среди автоматизированных производственных систем СИО является самостоятельной системой, которая выполняет совокупность действий, направленных на повышение эффективности технологического оборудования для изготовления заданной номенклатуры изделий с учетом требуемых качественных и количественных показателей технологического процесса в установленном режиме работы.

Основными задачами СИО являются:

1) расчет необходимого количества основного и резервного инструмента;

2) обеспечение бесперебойного снабжения станков инструментами;

3) обеспечение контроля состояния инструмента во время обработки;

4) обеспечение безопасной эксплуатации инструментов.

5) обеспечение настройки, ремонта, утилизации инструментов;

6) обеспечение учета и хранения инструментов.

Для каждого предприятия структура СИО разрабатывается с учетом уровня автоматизации производства, объемами выпуска продукции, структурами базовых технологических процессов, типами систем управления.

Моделирование СИО являются одним из этапов реинжиниринга автоматизированного обрабатывающего предприятия. На данном этапе можно оценить эффективность работы предприятия, в частности [4]:

– представление о работе СИО как о выполнении совокупности процессов позволяет оценить текущее качество функционирования СИО и выявить ее место в АСУ предприятием;

– система правил и терминов позволяет осуществлять декомпозицию до любого уровня при создании модели, наглядно иллюстрирующей структуру и взаимосвязи СИО и её составляющих;

– модель СИО служит источником информации о процессах и связях между ее компонентами, причем эта информация может быть извлечена из модели и представлена в виде отдельной базы данных, которая может в дальнейшем использоваться для решения других задач.

Использование количественных характеристик при моделировании позволяет:

– оценить оптимальность организации СИО и её составляющих,

– определить источники потерь времени и материальных ресурсов;

– проконтролировать вносимые изменения, направленные на организацию оптимальной работы СИО;

– сократить объем незавершенного производства.

Построенная по результатам внесенных изменений обновленная модель СИО может становиться предметом анализа и оптимизации любое количество раз до достижения наилучших результатов.

На основании вышеизложенного можно сделать выводы, что методология системного функционального моделирования позволяет:

1) получить достаточно полное и наглядное описание процессов, происходящих в сложных организационно-технических системах, к которым относится СИО станочного оборудования;

2) достичь любой необходимой глубины декомпозиции функционирования СИО, вплоть до описания действий, выполняемых отдельными специалистами на конкретных рабочих местах с указанием условий выполнения и перечня использованных ресурсов;

3) обеспечить коммуникацию и координацию в процессе совместной работы специалистов разного профиля и тем самым сократить сроки разработки или переналадки системы инструментального обеспечения.

В заключение следует отметить, что резервом повышения эффективности функционирования СИО является оптимизация их структурно-компоновочных решений и обеспечение единого информационного пространства, которые, в конечном счете, влияют на выбор типа, компоновки и технико-экономические параметры станков при модернизации производства.

Список литературы

1. Моделирование и управление производственными системами / В. Г. Митрофанов, О. И. Драчев, А. В. Капитанов; ЗАО "Оникс". – Ирбит: Оникс, 2011. – 239 с.

2. Методология функционального моделирования IDEF0: Руководящий документ [Текст]. – М.: Госстандарт России, 2000. – 75 с.

3. *Крылов, Е. Г.* Повышение работоспособности компонентов систем инструментального обеспечения станков / Крылов Е.Г., Козловцева Н.В. // Наука и образование в XXI веке : сб. науч. тр. по матер. междунар. науч.-практ. конф.

(31 окт. 2014 г.). В 17 ч. Ч. 2 / Консалтинговая компания Юком. - Тамбов, 2014. - С. 90-91.

4. *Козловцева, Н. В*. Построение информационных моделей компонентов машиностроительного предприятия на базе IDEF-методологии / Козловцева Н.В., Крылов Е.Г. // Южно-Сибирский научный вестник : сетевое издание. - 2014. - № 3 (декабрь). - С. 27-30.

MODELING INTELLIGENT MACHINE TOOL-ASSOCIATED SYSTEM'S COMPONENT BASED ON IDEF METHODS

Krylov E. G.[1], C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: app@vstu.ru

Kozlovtseva N.V.[2]**,** M.Sc. (Engineering), Post-graduate student, e-mail: knva2201@yandex.ru

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

[2] Moscow State University of Technology "Stankin", Russia, 127 055, Moscow, Vadkovsky per. 1.

Abstract: The article presents the details of modeling machine-building enterprise's services and systems activities. Authors describe the basic framework of IDEF-modeling. The basis of the IDEF methodology is graphical systems modeling languages that allows strictly and clearly describe the structure and interaction of subsystems on different levels of the enterprise. It describes the main characteristics of the tool-associated system as a component of automated machine equipment, affecting the flexibility and reliability of the products processing. It was established that the usage of quantitative adjectives in modeling reveals the optimum structural and layout solutions for tool-associated system. This method also allows you to assess the quality of operation, identify the sources of loss of time and material resources.

Keywords: modeling, information model, graphic language, tool-associated system, an intelligent machine.

УДК 51-74

ПРИМЕНЕНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ВЫБОРЕ СТРУКТУР АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

П. И. НИКОЛАЕВ[1], аспирант, ассистент
А. Н. СТАРОДУБОВ[1,2], канд. техн. наук, доцент
В. В. ЗИНОВЬЕВ[1,2], канд. техн. наук, доцент
([1]КузГТУ, г. Кемерово, Россия, [2]ИУ СО РАН, г. Кемерово, Россия)

650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Кузбасский государственный университет имени Т. Ф. Горбачёва

Аннотация: в работе рассмотрена проблема многовариантного выбора структуры автоматизированных производственных систем (АПС). Доказано преимущество применения эвристических методов для решения этой проблемы. Рассмотрены основные виды эвристических алгоритмов, составлены критерии, по которым можно оценить их эффективность при оптимизации выбора АПС. По составленным критериям произведено сравнение эвристических методов, сделан вывод о наиболее подходящем для решения поставленной задачи. На основе взятого метода разработан механизм совмещения эвристического поиска и имитационного моделирования в качестве калькулятора функции пригодности.

Ключевые слова: эвристические методы, автоматизированные производственные системы, имитационное моделирование, оптимизация.

В процессе проектирования АПС одним из наиболее важных факторов, влияющих на её производительность, является структура. Актуальной задачей является рациональное размещение как обрабатывающих устройств, так и транспортной инфраструктуры [1]. Решение такой задачи можно найти математическими, эвристическими методами и методами экспертных систем. Целесообразность использования эвристических методов приведена в работе [2]. Поставлена задача обоснования и выбора эвристического метода для выбора оптимальной структуры АПС. Основные эвристические методы показаны на рис. 1.

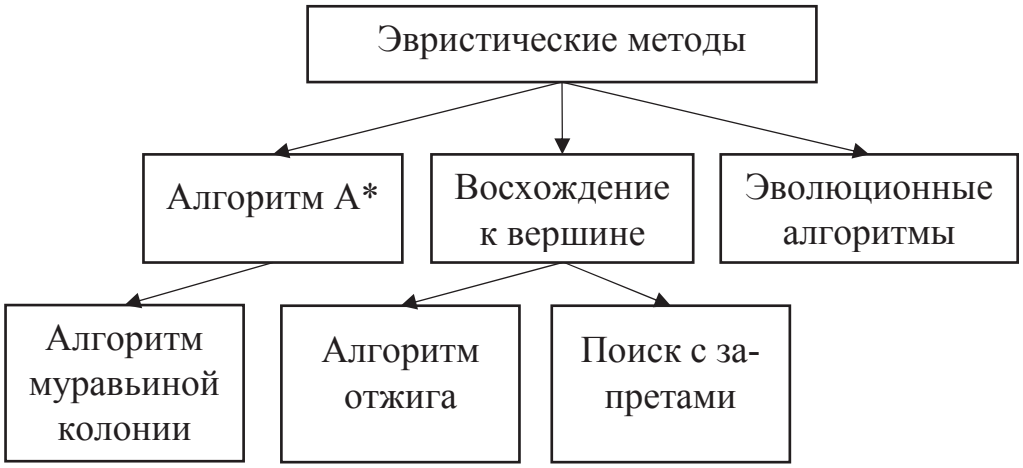


Рисунок 1. Эвристические методы

Алгоритм А* используется для нахождения приемлемого пути на графе. Его модификацией является алгоритм муравьиной колонии, преимущество которого заключается в рассмотрении не только текущих итераций, но и предыдущих. Применительно к выбору структуры АПС можно выделить два критерия, по которым можно оценить приемлемость эвристического метода. Первый критерий – это возможность эвристического перебора параметров структуры АПС. Так как семейство алгоритмов А* работает с графами, параметры которых являются статичными, то эвристический перебор структуры графа в рамках этого алгоритма невозможен, что не удовлетворяет критерию. Второй критерий – это возможность работы алгоритма в мно-

гомерном пространстве факторов. Так как семейство алгоритмов А* работает только в двумерном пространстве координат Xи Y, второму критерию оно тоже не удовлетворяет.

При использовании алгоритма восхождения к вершине на первом шаге из области факторов выбирается одна или несколько точек. На следующих итерациях рассматривается окрестность этой точки, и, если в окрестности находится лучшее решение, алгоритм «поднимается» до этой точки. Он останавливается в точках локального экстремума, и в таком случае не способен выйти на глобальный экстремум. Этот недостаток преодолевается в двух модификациях алгоритма. Алгоритм отжигареализуется в виде энергии скачка рассматриваемой точки с одной позиции области факторов на другую. Поиск с запретом запрещает посещать точки, которые уже рассматривались несколько итераций назад, что приводит результат в область глобального максимума. Семейство алгоритмов восхождения к вершине удовлетворяет первому критерию, приведённому выше, так как в них перебор идёт в области факторов, а значит в области параметров структуры АПС. Однако, чем больше факторов рассматривает алгоритм семейства восхождения к вершине, тем дольше достигается восхождение. В многомерном пространстве параметров АПС экстремум сложно найти такими алгоритмами, а значит они не удовлетворяют второму критерию.

Эволюционные алгоритмы представляют элементы многовариантного выбора в виде особей, геном которых представляет собой параметры элемента. Случайным образом генерируется популяция особей с различным геномом, а затем итерационно особи переживают операцию скрещивания – обмена геномом с получением новой особи, операцию мутации – случайного вмешательствав геном, и операцию селекции – выбор из получившихся особей лучших представителей. В случае выбора структур АПС в виде особей представлены отдельные структуры АПС, в виде генома – их параметры, а в результате работы алгоритма на выходе будет набор из N структур АПС, параметры которых позволят говорить об их оптимальном или субоптимальном выборе. Эволюционные алгоритмы удовлетворяют критерию перебора параметров структуры АПС, а также удовлетворяет критерию работы в многомерном пространстве факторов, так как все факторы учитываются в геноме особи, размер которого не ограничен. Итог сравнения эвристических алгоритмов по представленным критериям представлен в табл. 1.

Таблица 1 - Сравнение эвристических алгоритмов выбора оптимальной структуры АПС по критериям возможности перебора параметров АПС и возможности работы в многомерном пространстве факторов

Удовлетворение критерию	Семейство алгоритмов А*	Семейство алгоритмов восхождения к вершине	Эволюционные алгоритмы
Возможность перебора параметров АПС	Нет	Да	Да
Возможность работы в многомерном пространстве факторов	Нет	Нет	Да

Следуя предложенным критериям при решении задач выбора оптимального варианта структуры АПС целесообразно использование эволюционных алгоритмов.

Для решения задачи поиска оптимальных структур АПС, их оценки и генерации в автоматическом режиме был использован эволюционный алгоритм, т.к. в отличии от генетического, он не требует кодирования варьируемых данных в двоичную систему счисления.

Задача оптимизации структуры АПС заключается в том, чтобы для автоматизированной производственной системы, с заданной технологической программой, найти автоматизированную складскую систему (АТСС) с таким расположением оборудования, транспортной системой и другими параметрами, при которых критерий эффективности АТСС будет стремиться к экстремуму $F(\bar{G}) = extr\, F(G)$при выполнении следующих ограничений:

- ограничение на размер производственного помещения

$$X_S^{min} \le X_S \le X_S^{max}; \quad Y_S^{min} \le Y_S \le Y_S^{max}; \quad Z_S^{min} \le Z_S \le Z_S^{max}; \qquad (1)$$

где Xs – ширина производственного объема, Ys – длина производственного объема, Zs – высота производственного объема;

- расстояние между оборудованием не может быть меньше допустимого

$$p(A_i, A_k) \ge [l]_{ik}\,, i \ne k; \qquad (2)$$

где $p(A_i, A_k)$ – расстояние между i и k-ми производственными модулями, $[l]_{ik}$ – минимально допустимое расстояние между i и k-ми производственными модулями.

- порядок размещения оборудования в зависимости от типа транспортной системы.

Составляющие критерия эффективности АТСС:

Общее время производства

($T_{п.ц} \to min$) (3)

Коэффициент загрузки оборудования

($T_{заг.об.} \to max$) (4)

Показатель приведенных затрат
$З = \sum_{i=1}^{n}\left[N_j(\delta+\beta)S_{ст}\sum_{i=1}^{m}T_{Фij} + (E_н+\alpha)F_j/F_э\sum_{i=1}^{m}A_{ij}a_i\right] \rightarrow min$ (5)

Для работы операторов эволюционного алгоритма необходимо закодировать характеристики, определяющие структуру АПС. Для этого характеристики были записаны в генотип, следующего вида (рис. 2).

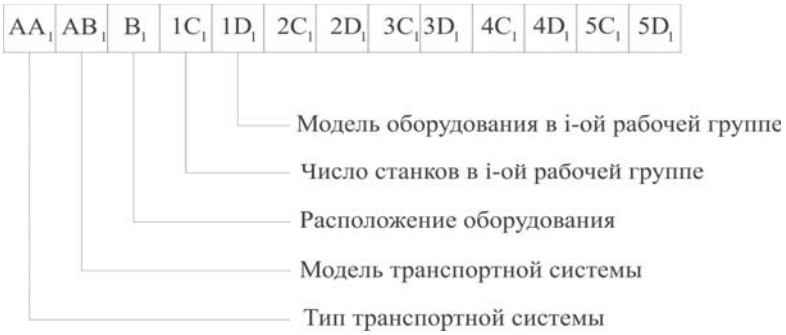


Рисунок 2 – Кодирование параметров, определяющих структуру АПС

К этим характеристикам относятся: тип транспортной системы, модель транспортной системы, порядок расположения оборудования, число станков в каждой рабочей группе, модель станков рабочей группы. Транспортная система может быть следующих типов: конвейер, рольганг, мостовой кран, кран штабелер, круговой промышленный робот, роботизированная тележка. Расположение оборудования может быть следующим: круговое, шахматное и линейное. Работа эволюционного алгоритма представлена на рис. 3. Для поиска необходимо определить операторы скрещивания, мутации, селекции, число «жизней» особи (варианта АПС), функцию пригодности (набор имитационных моделей АПС), критерии эффективности (производительность, коэффициент загрузки оборудования, стоимость оборудования), граничные условия, критерии завершения поиска. Начальная популяция вариантов АПС генерируется или компьютером, или пользователем. Первый вариант предпочтителен, т.к. позволяет избежать влияние человеческого фактора. Механизм генерации начальных вариантов должен обеспечивать генетическое разнообразие особей. С помощью функции пригодности определяются параметры особи (сгенерированный вариант АПС оценивается с помощью имитационного моделирования).

Если найденные варианты удовлетворяют критерию завершения (количество итераций алгоритма, длительное отсутствие изменений в генерируемых вариантах АПС), то закончить поиск. Если нет, то создать новый набор вариантов АПС. Генерация нового набора вариантов АПС состоит из трех составляющих. Лучшие текущей популяции переходят в следующую популяцию. Переход экземпляров из одной генерации в другую позволяет сохранить лучшие варианты АПС, а ограниченность количества таких переходов, позволяет избежать ловушки локального минимума. Часть особей нового набора вариантов АПС генерируется в результате «скрещивания» вариантов АПС текущего набора. Этот механизм позволяет улучшить набор вариантов АПС. Часть вариантов АПС нового набора генерируется путем мутации, т.е. варианты АПС текущего набора получают какие-либо признаки не характерные для текущей набора (например, меняется тип транспортной системы). Механизм мутации позволяет уйти от ловушки локального минимума. Для каждого сгенерированного варианта АПС создается имитационная модель, позволяющая оценить полученный вариант. Создание новых наборов вариантов АПС происходит, пока не будет удовлетворен критерий завершения поиска.

Таким образом, для решения задачи поиска оптимального варианта структур АПС на многомерном невыпуклом пространстве, характеризующимся наличием нескольких локальных и одного глобального максимума, целесообразно применение эволюционного алгоритма, позволяющего за короткое время получить структуру, близкую к оптимальной.

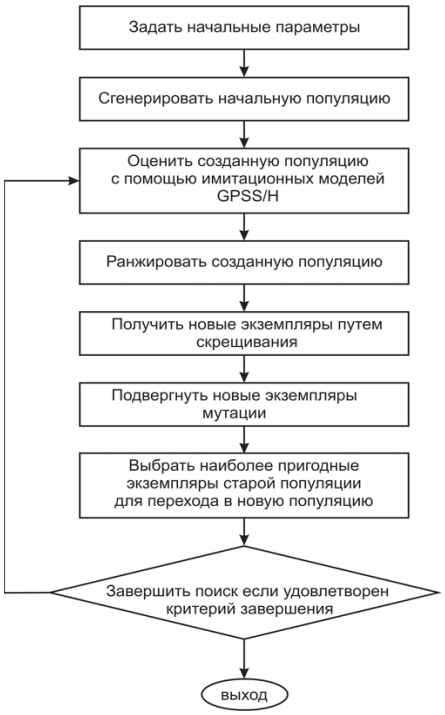


Рисунок 3 - Блок-схема работы эволюционного алгоритма

Список литературы

1. *Полетаев В. А.* Создание концепции имитационного моделирования автоматизированных производственных систем. / В. А. Полетаев, В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – №5. – с. 113-118

2. *Николаев, П. И.* Методы оптимизации структур АПС / П. И. Николаев // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: сб. науч. тр. / КузГТУ – Кемерово, 2014. – с. 406-407

THE USE OF HEURISTIC METHODS FOR COMPUTER-AIDED MANUFACTURING STRUCTURE CHOISE

Nikolaev P. I.[1], postgraduate, assistant, e-mail: mrnikolaev@mail.ru
Zinovyev V. V.[1 2], C.Sc. (Engineering), Docent, e-mail: zv150671@gmail.com
Starodubov A. N.[1 2], C.Sc. (Engineering), Docent, e-mail: st_a_n@mail.ru

[1]T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation
[2]Institute of Coal of SB RAS, 10 Ave. Leningradskiy, Kemerovo, 650065, Russian Federation

Abstract: The material in this article represents a problem of computer-aided manufacturing (CAM) structure multiple choice. Existing heuristic methods have an opportunity to solve this problem. They have a proven advantage over mathematical methods and expert systems. The authors is adducingmain types of heuristic algorithms and compiling criteria that allow comparing heuristic methods in relation to the CAM structure choice. On the criteria base authors is correlating algorithms, result of comparison is a benefit of genetic algorithm over the others in solving structure choice optimization. This method becomes the base to technology, which combine a heuristic methods with simulate modeling as calculator of fitness function.

Keywords: Heuristic methods, CAM, simulate modeling, optimization.

УДК 519.67

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

В.В. СМИРНОВ, канд. техн. наук, доцент
(*БТИ АлтГТУ, г. Бийск, Россия*)

Смирнов В.В. – 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 19
Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова
e-mail: mrsi@bti.secna.ru

Аннотация: В статье представлен обзор методов математического моделирования контактных явлений при механической обработке материалов. Показано, что существующие модели имеют сравнительно узкую область адекватности и, вместе с тем, в области вычислительной и традиционной математики имеются резервы ее расширения.

Ключевые слова: *математическое моделирование, механическая обработка, контактные явления*

Введение

Контактные явления при механической обработке материалов являются определяющим фактором процесса формообразования, влияют на основные показатели качества, производительности и себестоимости технологического процесса. В этой связи современные требования, предъявляемые к надежности технологических систем, могут быть удовлетворены лишь при условии обеспечения процесса оперативной и достоверной информацией об особенностях контакта заготовки и инструмента. Для этого исследователи предлагают ряд подходов теоретического и эмпирического характера. Особое место в этом ряду занимают методы математического моделирования, которые позволяют:

- значительно снизить материало- и энергоемкость предпроектных исследований;
- выявлять общие закономерности и прогнозировать ход обработки;
- исследовать гипотетические процессы и критические режимы функционирования технологических систем;
- сократить сроки на подготовку и анализ опытных данных;
- использовать результаты моделирования в работе специальных программно-технических средств.

Использование традиционных методик анализа напряженно-деформированного состояния

Теория

Моделирование контактных явлений достаточно давно привлекает внимание отечественных и зарубежных специалистов по механообработке. Теоретическим изучением контактной зоны при резании занимались Г.И. Грановский, А.И. Исаев, Н.И. Ташлицкий, М.Э. Иткин, Н.Г. Абуладзе, H. Opitz, T. Özel, J.S. Tsai, и др. конструкции основано на упрощении и схематизации нагрузок (принцип Сен-Венана), что приводит к смешанной задаче теории упругости с заданными на границе силами и смещениями. Такие упрощения удобны и часто позволяют достичь адекватных результатов, но в большинстве случаев их нельзя считать максимально приближенными к реальности. К необходимости решения физически нелинейной контактной задачи приводят:

- большие формоизменения материала в зонах первичной и вторичной деформации;
- высокие концентрации контактных напряжений, сопровождающиеся появлением деформации пластичности и ползучести;
- фрикционное взаимодействие материалов на стадии разделения стружки и заготовки, определяющее зависимость между перемещениями и усилиями на контактных площадках передней и задней поверхностей инструмента;
- проектирование обработки деталей из синтетических материалов с низким или неравномерно распределённым модулем упругости.

Все перечисленные факторы в совокупности со сложной геометрией зоны резания, разнообразием температурных и силовых воздействий очень чувствительны к изменениям условий резания и, вследствие этого, ставят решение контактной задачи при механообработке в рамки трудноразрешимой инженерной проблемы. Обобщая экспериментальные данные, Н.Н. Зорев и А.И. Бетанели предложили формулы для определения контактных напряжений на передней поверхности режущего инструмента. Используя метод линий скольжения на основе теории жестко-пластического тела Т.Н. Лоладзе оценивал контактное давление вблизи режущей кромки путем анализа напряженного состояния

в зоне стружкообразования. М.Ф. Полетика показал возможность решения контактной задачи при резании как смешанной задачи упругости о воздействии на упругое тело жесткого индентора, используя методы теории функций комплексных переменных. С.С. Силин анализировал контактные явления на основе уравнений баланса энергий и применении методов теории подобия.

Отличительной особенностью математических моделей контактных процессов является то, что обычно они формулируются в виде краевых задач для систем дифференциальных уравнений со смешанными граничными условиями. Так, если рассматриваемая область пространства, занятая сплошной средой, ограничена конечным числом граней, то хотя бы на одной из этих граней на различных ее участках должны быть сформулированы различные граничные условия. К настоящему времени существует большой набор аналитических методов решения контактных задач. Однако в инженерной практике учтены еще не все достижения, имеющиеся в этой области, и круг практических примеров моделирования обычно ограничивается рассмотрением областей с канонической геометрией, простой структурой и несложным взаимодействием с окружающей средой. В реальных задачах искомая величина зависит, как правило, от нескольких переменных, а исследуемый объект (резец, заготовка) является телом сложной формы с неоднородной структурой и со сложным характером взаимодействия с внешней средой при нестационарном режиме. В этой связи аналитическое решение каждой конкретной задачи часто сопряжено с большими трудностями математического характера.

Наряду с классическими постановками контактной задачи существует её вариационная формулировка, которая предусматривает построение функционала, достигающего минимума на решении исходной задачи и, кроме того, имеющего граничные условия в качестве необходимых условий экстремума. При этом на поверхности раздела контактирующих тел вводятся связи специального вида, способные передавать только односторонние сжимающие усилия в направлении общей нормали к контактирующим поверхностям. Взаимные перемещения соприкасающихся тел в том же направлении не могут быть произвольными и ограничиваются условиями непроникания контактирующих тел друг в друга. В вариационной постановке решение контактной задачи без трения сводится к проблеме минимизации функционала полной энергии системы с линейными ограничениями в виде неравенств. С точки зрения методов оптимизации – это задача нелинейного программирования, и для ее решения применимы известные процедуры градиентного спуска, возможных направлений, множителей Лагранжа и др. Такой подход к решению контактных задач тесно связан с использованием современных численных методов, таких, как вариационно-разностный метод и метод конечных элементов (МКЭ), базирующихся на эквивалентных вариационных формулировках задачи. Причем большинство авторов отдает предпочтение МКЭ благодаря его высокой универсальности и эффективности.

Одними из первых известных работ с использованием численных методов и вычислительного эксперимента для изучения температурных полей и напряжений в режущем инструменте были исследования, проведенные в Киевском политехническом институте под руководством проф. В.А. Остафьева и в Белорусском политехническом институте под руководством проф. П.И. Ящерицына. В настоящее время известен ряд подходов к решению контактной задачи МКЭ. Наиболее прост с алгоритмической точки зрения прием, основанный на вычислении коэффициентов взаимного влияния точек контактирующих тел в нормальном и касательном направлениях [1]. С помощью метода сил для составления равновесия каждого тела в отдельности находится распределение контактных напряжений. Полученные значения напряжений используются в качестве граничных условий для повторного вычисления напряженного состояния контактирующей пары. Границы контактных площадок и участки проскальзывания находятся итерационным путем в процессе решения задачи.

Существует группа методов решения контактной задачи МКЭ, где условия взаимодействия между телами моделируются с помощью соотношений физически нелинейных задач механики твердого тела и механика контакта рассматривается по аналогии с пластическим течением. Еще один путь к решению контактных задач МКЭ открывается с использованием специальных стыковочных элементов, моделирующих диаграмму «сила-смещение» на поверхностях раздела взаимодействующих тел. При этом обычно применяются одномерные стыковочные элементы с различными законами распределения перемещений и соответствующими трудностями, возникающими при учете проскальзывания и трения. Кроме того, имеются предложения по решению контактной задачи без использования каких-либо аналогий и стыковочных элементов. В отличие от предыдущего подхода, где контактные элементы объединяют взаимодействующие тела в одну систему, здесь контактирующие тела рассматриваются раздельно. При этом общая система пополняется определенным количеством уравнений совместности, кратным числу контактирующих узлов. Для решения задачи обычно применяется

пошаговый процесс нагружения с уточнением граничных условий на каждом шаге итерационным методом. Приращения нагрузки выбираются достаточно малыми для сохранения линейной связи между перемещениями и деформациями в пределах каждого шага по нагрузке. Такой подход требует многократного решения краевой задачи, а также построения сложных итерационных алгоритмов корректировки граничных условий.

При исследовании процессов резания некоторые авторы применяют МКЭ в эйлеровой формулировке, особенность которой состоит в том, что модель разрушения основана на выделении в некоторой области материала (например, при вершине резца) некоторой линии раздела (фиктивной трещины), по которой предположительно будет осуществляться разделение заготовки. Другая часть исследователей полагается на лагранжеву формулировку МКЭ, которая позволяет детально моделировать процесс отделения стружки, хотя требует для этого введения специального критерия, определяющего момент разделения материала заготовки. В результате, установление критерия разделения материала стало представлять собой отдельную важную задачу. К числу других проблем, рассматриваемых авторами, относятся: учет при моделировании сил трения, пластических и температурных деформаций, остаточных напряжений [2-5].

До конца XX века, большинство исследователей использовало собственный программный код, реализующий МКЭ. Это позволило выявить некоторые возникающие вычислительные трудности, главная из которых связана с необходимостью перестроения расчетной сетки в связи с происходящими большими термоупруго-пластическими деформациями и формированием элемента стружки. Значительных вычислительных ресурсов требовало трехмерное моделирование и моделирование многосвязных областей. В настоящее время многие исследователи стремятся использовать профессиональные пакеты программ, многие из которых также обладают возможностью написания собственных программных кодов.

Начиная с 1980-х годов, неизменно росло количество публикаций, посвященных применению методов граничных интегральных уравнений (МГИУ) к решению контактных задач. По мнению специалистов, использование МГИУ, обладающих высокой точностью результатов в зонах больших градиентов напряжений, простотой реализацией и малым объемом входной информации, дает ряд преимуществ по сравнению с аналогичными схемами МКЭ. Наиболее удобным и употребимым для решения контактных задач признаётся прямой вариант МГИУ, где решением являются неизвестные граничные значения переменных, выраженные в естественных физических величинах. Постановки и подходы к решению контактных задач МГИУ во многом сходны со схемами МКЭ. Имеются апробированные методики решения плоских контактных задач, в том числе при наличии фрикционного взаимодействия. Решены задачи о давлении ролика на упругое основание, о контакте круглого диска с границей отверстия в бесконечной области, взаимодействии стальной заклепки с алюминиевым бесконечным листом, ряд осесимметричных и плоских задач о внедрении штампов в упругие тела и др. Задачи анализа напряжений при контакте двух тел решаются с использованием постоянных, линейных и квадратичных граничных элементов. В связи с характерной геометрией процесса резания, особого внимания заслуживает исследование особенностей применения МГИУ при наличии угловых точек на границе.

Результаты и обсуждение

Спектр приложений численных методов, таких, как МГИУ и МКЭ, к решению контактных задач постоянно расширяется. При этом нельзя утверждать, что вычислительный эксперимент вполне отражает все особенности процесса обработки. В большинстве публикаций последних десятилетий используется двумерная постановка краевой задачи, в которой напряженно-деформированное состояние объектов определяется соотношениями осесимметричной либо плоской задачи теории упругости. Это обстоятельство объясняется двумя причинами: сложностью анализа контактных явлений в трехмерной постановке и недостаточной мощностью вычислительных средств для удовлетворительного описания в пространстве геометрии взаимодействующих тел. В существенно трёхмерной постановке МКЭ рассмотрены лишь некоторые задачи для упругих и идеально упругопластических тел простейшей формы, задачи о внедрении штампов произвольного очертания в упругие тела. Относительно малое число публикаций касается проблем учета физической нелинейности деформирования в контактной области. При этом решены некоторые задачи о внедрении штампов в упругопластические тела, в том числе, с использованием различных критериев текучести, законов упрочнения, сложного характера нагружения и при наличии деформаций ползучести материала.

Разнообразие процессов механической обработки обусловливает недостаточную универсальность известных алгоритмов, поскольку они разрабатываются для решения задач определенного класса и не могут быть автоматически применены ко всем контактирующим материалам и условиям обработки. Одни из них имеют трудности, связанные с учетом трения в контакте, другие не рассматривают физическую нели-

нейность процесса деформирования и т.д. Попытки построения более общих алгоритмов решения такого рода нелинейных задач приводят, как правило, к наложению друг на друга ряда итерационных процедур. В этом случае вычислительная схема задачи становится чрезвычайно громоздкой, что отражается на сходимости процесса решения и затратах машинного времени. Поэтому поиск простых и эффективных методов решения контактных задач с учетом сложной геометрии, условий нагружения и характера деформирования по-прежнему остается актуальной задачей механики твердого деформируемого тела.

Заключение

В заключении приведем основные выводы по данной работе.

1. Математическую модель контакта инструмента и заготовки целесообразно строить на основе дифференциальных уравнений механики сплошной среды со смешанными граничными условиями или на основе эквивалентной вариационной формулировки.

2. Традиционные методики анализа контактных явлений при резании получили небольшое распространение, в виду значительных упрощений в постановке задачи и, как следствие, узкой области адекватности принятых математических моделей.

3. Имеется ряд развитий аналитических, численных и гибридных методов, которые пока не нашли широкого применения для анализа процессов резания с точки зрения механики контакта.

4. Повышение эффективности математических моделей контакта в процессе резания должно быть направлено на расширение их области адекватности путем учета нелинейности входных и выходных параметров, а также связи технологической системы с окружающей средой.

Список литературы

1. *Смирнов В.В., Спиридонов Ф.Ф.* Пространственное положение условной плоскости сдвига при обработке резанием // Инженерно-физический журнал, 2004. Том 77, – № 6. – С. 46-47.

2. *Шипачев, А.Н., Зелепугин С.А.* Численное моделирование процессов высокоскоростного ортогонального резания металлов // Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех., 2009, – № 2(6), 109–115.

3. *Виноградов Ю.В.* Моделирование процесса стружкообразования в задачах резания методом конечных элементов. // Известия ТулГУ. Серия «Математика, механика, информатика», – 2003, – № 3, – с. 15–18.

4. *Кукуджанов В.Н., Левитин А.Л.* Численное моделирование процессов резания упруговязкопластических материалов в трехмерной постановке // Изв. РАН. МТТ. 2008. № 3. С. 208-216.

5. *Смирнов В.В*. Математическое моделирование в физике резания. // Известия ТулГУ. Серия: Технологическая системотехника, – 2003. – №1, –С. 42–43.

MATHEMATICAL MODELING OF CONTACT PHENOMENA IN MACHINING

Smirnov V.V., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU, 27 street Trofimov, Biysk, 659305, Russian Federation

Abstract: The article presents an overview of mathematical modeling of contact phenomena in machine processing of materials. It has been stated that the existing models have a relatively limited range of adequacy. However, there is a potential for these models to be improved in the field of computer science and traditional mathematics.

Keywords: mathematical modeling, machining, contact phenomena.

УДК 681.3

МЕТОДОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕГРИРОВАННОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В. А. ПОЛЕТАЕВ, доктор техн. наук, профессор
И. В. ЧИЧЕРИН, кандидат техн. наук, доцент
(*КузГТУ, Кемерово*)

650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Кузбасский государственный университет имени Т. Ф. Горбачёва

Аннотация: Проведен анализ реализаций САПР ТП для интегрированных производств. Работа представляет подход к построению САПР ТП в интегрированном производстве на едином математическом и программном обеспечении, настраиваемом применительно к любой группе оборудования с ЧПУ.

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования технологических процессов, единое информационное пространство, интегрированное производство.

Основой интегрированного автоматизированного производства (ИАП) является широкое использование гибких производственных систем (ГПС) при изготовлении изделий и систем автоматизированного проектирования (САПР) для технической (конструкторской и технологической) подготовки производства. Концепция ИАП позволяет полностью интегрировать весь производственный цикл – от идеи до выпуска готовой продукции – путем автоматизации всего комплекса процессов производства и управления на базе ЭВМ [1, 2,3].

Настоящая работа представляет описание подхода к построению САПР ТП в ИАП на едином математическом и программном обеспечении, настраиваемом применительно к любой группе оборудования с ЧПУ.

Методология проектирования в САПР для ИАП строится исходя из важнейших требований к САПР: адаптивность, развиваемость и тиражируемость. Основные принципы построения САПР, обеспечивающие перечисленные требования – это принцип модульности, принцип унификации (стандартизации) и принцип системного единства.

Применительно к технологии обработки деталей на оборудовании с ЧПУ указанные принципы позволили сформулировать следующие положения методологии автоматизированного проектирования в САПР.

Процесс проектирования выполняется реализацией преимущественно типовых проектных процедур за несколько этапов. На каждом этапе синтезируется одно или несколько проектных решений, выбираемых из множества типовых проектных решений (ТПР). На уровне (этапе) проектирования маршрута ТПР выбираются из множества типовых маршрутов; на уровне проектирования операций ТПР выбираются из множества типовых операций; на уровне проектирования управляющих программ (УП) ТПР выбираются из множества типовых циклов обработки. Последнее множество является базовым в САПР. Таким образом, типовые операции строятся из типовых циклов обработки, типовые маршруты – из типовых операций. Из этого следует, что ТПР более высоких уровней должны быть согласованы с ТПР более низких уровней. Это условие предопределяет ограничения на способы задания описаний ТПР разных уровней и на способы задания правил выбора ТПР.

Каждое ТПР характеризуется двумя свойствами: структурой и параметрами. В процессе проектирования типовые проектные процедуры (ТПП) реализуются одной или несколькими проектными операциями.

Типовая операция структурного синтеза одного ТПР реализует выбор ТПР из множества типовых структур (циклов, технологических операций, технологических маршрутов).

Типовая операция параметрического синтеза одного ТПР реализует параметризацию структурного решения. В частности, на уровне типовых циклов обработки определяются параметры режима обработки, координаты опорных точек траектории перемещения инструмента и другие параметры обработки. На уровне типовых операций определяется длительность выполнения операции, момента времени смены заготовок и деталей и др.

Типовая операция принятия решения рассматривает значения показателей качества ТПР для выбранных алгоритмов и производит выбор окончательного решения.

Процесс проектирования выполняется методом "сверху-вниз", то есть от уровня маршрута ТП к уровню УП для ЧПУ. При этом структурный синтез ТП предшествует параметрическому

либо на каждом уровне проектирования, либо по всему ТП в целом. В последнем случае параметризация ТП может быть затруднена. Наиболее приемлемо строить процесс по этапам совместно с процессом синтеза структур. Такое сочетание предъявляет к ПО САПР требования гибкости организации взаимосвязей модулей.

Весь процесс проектирования и отражения его в структуре САПР строится на основе классификации и унификации технологических элементов. Классификация элементов ТП и понятий выполняется по уровням проектирования [2].

Автоматизированное проектирование структуры ТП выполняется методом выбора элементов ТП на соответствующих уровнях иерархии ТП. Основой применения процедурой выбора является структурная модель типового элемента, содержащая последовательность и перечень элементов уровня [2].

При проектировании маршрута исходными данными являются: кодированные сведения о детали, множество типовых маршрутов и знаний (правил) выбора типового маршрута. На основе сопоставления кодированных сведений о детали и условий выбора, зафиксированных в правилах принимается решение о выборе типового маршрута ТП, обеспечивающего изготовление заданной детали. Возможно сохранение альтернатив для последующего развития множества возможных реализаций ТП (принцип неокончательности принимаемых решений).

Структура маршрута ТП представлена последовательностью:

$$M = < e1, e2, \ldots, em > ,$$

где ei - элемент (операция) маршрутного описания ТП.

Элемент задается системой:

$$ei = (Ii, Ai),$$

где Ii – информация об элементе; Ai – алгоритм (правило) выбора элемента ei.

При проектировании просматривается последовательность M, поочередно выбираются элементы ei, и для каждого из них производится попытка выбора с использованием правила Ai. Если выбор возможен, то элемент ei включается в состав маршрута ТП. Алгоритм представлен либо в виде правила принятия решений, либо указанием процедуры диалогового выбора (выбор производится технологом в режиме диалога с ЭВМ), либо указанием о безусловном включении элемента в ТП. В последнем случае возможна корректировка состава выбранных элементов по окончании просмотра всей последовательности M.

При переходе к элементам ниже лежащего уровня детализации исходными данными являются те же кодированные сведения о детали и информация о выбранных элементах ei. Далее процесс повторяется для каждого элемента, который теперь рассматривается как последовательность: $Ei = < f1, f2, \ldots, fm >$, которая задается аналогично M для маршрута.

Очевидно, что приведенная схема позволяет применять один и тот же комплекс программ, реализующих метод выбора решений при формировании структуры. Структура программно-методического комплекса для проектирования ТП представлена на рис. 1. Функциональное назначение подсистем и вычислительные процедуры рассмотрены в работе [2,3].

Приведенная структура САПР ЧПУ позволяет создавать специализированные системы автоматизации проектирования УП практически без программирования, а путем настройки, выполняемой технологами предприятий.

Для реализации САПР ТП для ИАП по приведенной структуре и рассмотренной идеологии проектирования были исследованы: формальная постановка задач проектирования ТП; системные свойства ТП; формальные модели процесса принятия решений; моделирование структур ТП; математическое моделирование структур ТП; представление и обработка знаний в процедурах выбора решений; базовые функции отображения геометрической и технологической информации УП; организация хранения данных базы знаний [2].

Формальная постановка задач проектирования ТП

Проектирование ТП механообработки будем рассматривать как задачу проектирования технических систем или Т-систем некоторого целевого назначения [1, 2] (рис. 2).

Т-система многопредметная, если D есть множество различных объектов: $D = \{a1, a2, \ldots, aN\}$. Очевидно, что в многопредметной Т-системе есть множество: $T = \{t1, t2, \ldots, tN\}$, в которой каждый элемент ti – это ТП изготовления одного объекта $di \in D$. Будем называть ti рабочим технологическим процессом (РТП) обработки детали di; множество D группой деталей, а множество T – унифицированным технологическим процессом (УТП) – групповым или типовым – при изменяемом или неизменяемом процессоре Q.

Т-системы механической обработки деталей относятся к категории сложных, и для их описания и исследования применяется теория иерархических систем. Расчленение ТП по уровням иерархии определяется содержанием проектной задачи, а также конструктивными, технологическими и организационными особенностями Т-системы.

Задача проектирования участка механической обработки определяет двухуровневое описание ТП: описание ТП как целое и описание ТП как множества взаимосвязанных операций (маршрутное описание ТП).Задача проектирования ТО требует описания ТП на уровнях опе-

рации, позиционного перехода, блочного перехода, инструментального перехода, элементарного перехода.

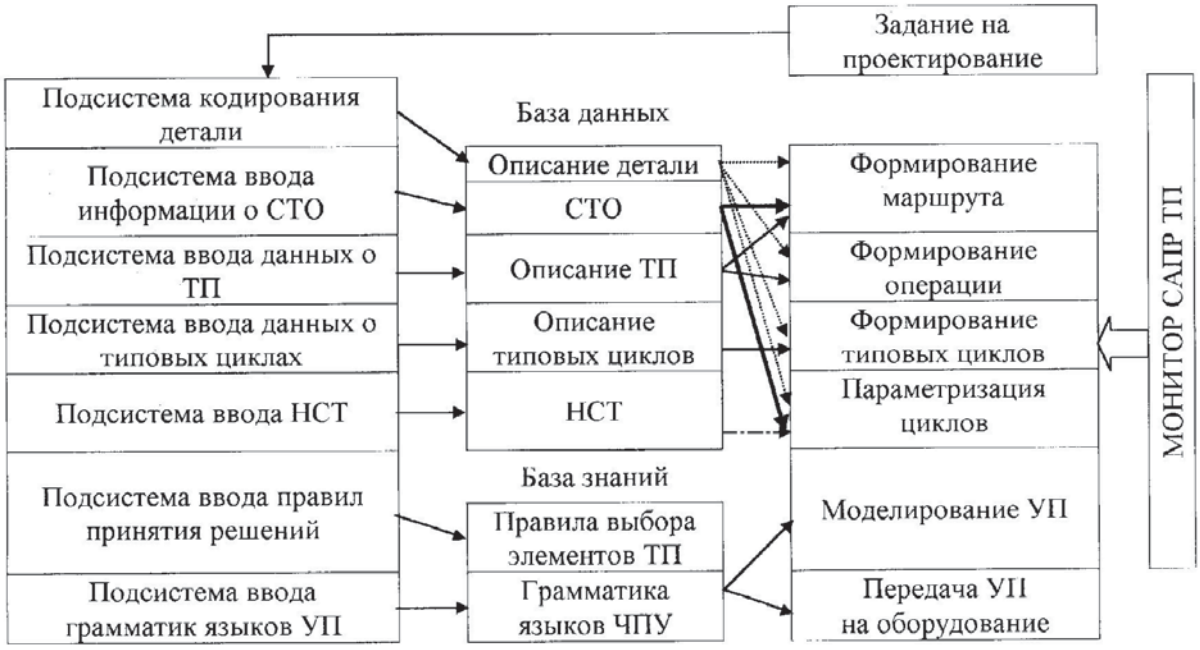


Рисунок 1 – Структура комплекса программ САПР ТП

Многоуровневое расчленение ТП приводит к декомпозиции функции Т-системы на элементарные функции:

$$\varphi_j^i : D_{oj}^i \to D_j^i, \qquad (1)$$

где i – номер уровня расчленения; j – номер элемента ТП, выполняемого на i-ом уровне; Dioj и Dij - соответственно, состояния заготовок и деталей до и после выполнения j-го элемента ТП i-го уровня иерархии.

Состояние любой детали и заготовки di ∈ D в процессе обработки описывается кортежем признаков данной детали n : di = (x1i, x2i, …, xni). Поэтому функции ТП ti изображается траекторной в пространстве признаков xn, называемой фазовой.

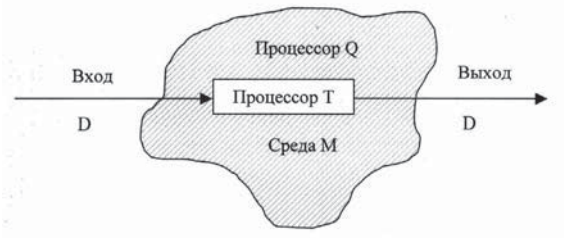


Рис. 2. Представление Т-системы на макроуровне: Do и D - соответственно исходное и конечное состояния детали Q – совокупность взаимосвязанных средств технологического оснащения, взаимодействующих в технологическом процессе Т с целью получения D

Функции, соответствующие отдельным элементам ТП, изображаются отрезками этой фазовой траектории. Очевидно, что переход на более низкие уровни иерархии сопровождается дополнительными разбиениями фазовой траектории на отрезках. Для многопредметных Т-систем существует множество фазовых траекторий, каждый из которых соответствует РТП ti ∈ Т. Различие траекторий определяется с точностью до параметров управления ТП или с точностью до структуры ТП.

Выделяемые на каждом уровне иерархии элементы ТП различаются типом и параметрами. Тип элемента ТП определяется способом и средствами его реализации: методом обработки, схемой базирования, типом станка, приспособлением, инструментом и т.п. Параметры ТП, в свою очередь, разделяются на фазовые и управляющие, между которыми существует функциональное соотношение. Изменение управляющих параметров ТП приводит к изменению фазовых параметров, а следовательно, к изменению фазовой траектории. В общем виде эта зависимость может быть представлена моделью:

$$\bar{x} = f(\bar{x}_O, \bar{u}), \qquad (2)$$

где $\bar{x}$ - вектор фазовых координат; $\bar{u}$ - вектор управляющих параметров; f – функциональное соответствие, однозначно определенное типом элемента ТП.

Таким образом, для каждого типа элемента ТП можно описать множество фазовых траекторий (рис. 3 и 4):

$$\Phi = (f, \bar{x}, \bar{u}). \qquad (3)$$

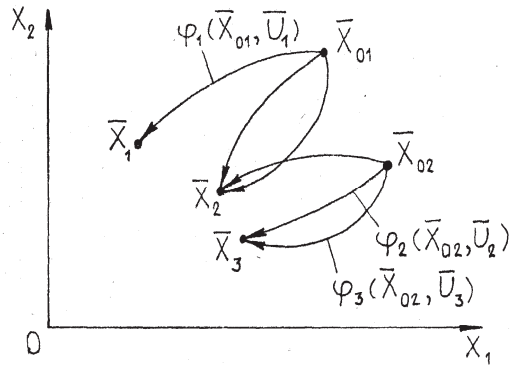


Рисунок 3 – Множество фазовых траекторий технологического процесса при разных векторах управления параметрами

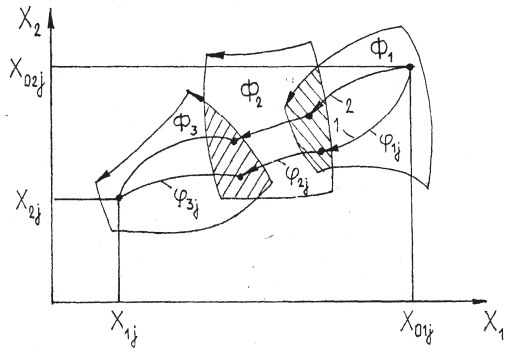


Рисунок 4 – Область функциональных возможностей управляемого технологического процесса

Функциональную структуру ТП на любом уровне расчленения можно задать моделью [2]:

$$\begin{cases} \Sigma_{\phi} = (F, S_{\phi}) \\ S_{\phi} \subseteq F \times F \end{cases}, \qquad (4)$$

где F = { f_i } - множество функций, описывающих элементы ТП; $S_ф$ – множество функциональных связей ТП.

Вводя в фазовое пространство X^n время выполнения ТП, можно задать переменную структуру ТП отношением порядка следования элементов ТП во времени:

$$\begin{cases} \Sigma_{в} = (\{\varphi_i\}, S_{в}) \\ S_{в} \subseteq \{\varphi_i\} \times \{\varphi_i\} \end{cases}. \qquad (5)$$

Заменив в последнем выражении каждый отрезок фазовой траектории φ_i на его описание системой $(f_i, \overline{x}_{oi}, \overline{u}_i)$, и обозначая эту систему q_i , запишем выражение временной структуры ТП в виде:

$$\begin{matrix} \Sigma_{в} = (G, S_{в}) \\ G = \{q_i\}, S_{в} \subset G \times G \end{matrix}. \qquad (6)$$

Множество элементов G ТП реализуется в Т-системе процессором Q, который расчленяется на множество функционал функциональных элементов Q = { q_i } на тех же уровнях, что и ТП. Будем называть элемент $q_i \in Q$ элементарным Т-процессором (на определенном уровне иерархии). Причем каждому элементу ТП $g_i \in G$ сопоставляем элементарный Т-процессор $q_i \in Q$. Поэтому содержательно под элементарным Т-процессором будем понимать систему, состоящую из совокупности взаимосвязанных элементов и способную выполнять заданный элемент ТП.

Поскольку элементарные Т-процессоры объединяются в Т-системе пространственной компоновкой, то выполнено соответствующих элементов ТП в заданном порядке связано с изменением пространственного положения обрабатываемых заготовок и элементарных Т-процессоров. Поэтому пространственной структурой ТП будем называть соответствие между элементами ТП и элементарными Т-процессорами:

$$\begin{cases} \Sigma_n = (\{G, Q\}, S_n) \\ S_n \subseteq G \times Q \end{cases}. \qquad (7)$$

где $G = \{g_i\}, \ i = \overline{1,m}$ - множество элементов ТП данного уровня расчленения; $Q = \{q_i\}, \ i = \overline{1,l}$ - множество элементарных Т-процессоров данного уровня.

Выражение структуры Т-процесса на некотором уровне иерархии может быть представлено в следующем виде [2]:

$$\begin{matrix} \Sigma_{\phi} = (Q, S_{\phi}) \\ S_{\phi} \subseteq Q \times Q \end{matrix}. \qquad (8)$$

Моделью ТП, получаемую в процессе проектирования, будем называть технологическим решением. Процесс принятия решения является поиск решений задачи проектирования ТП, оптимальных в смысле некоторого критерия и удовлетворяющих требованиям технологического задания (ТЗ) на проектирование. В данном случае обеспечение заданной точности изготовления деталей и сборочных единиц.

Абстрактная модель ППР может быть представлена на теоретико-множественном уровне в виде:

$$\begin{cases} \Gamma_{oj} = r_j \\ o_j \in O, \ r_j \in R, \ \Gamma \subseteq O \times R \end{cases}, \qquad (9)$$

где O – множество объектов, относительно которых принимаются решения; R – множество принимаемых решений; Г – соответствие, сопоставляющее элементам множества O элементам множества R; o_j и r_j – соответственно j-й объект и j-ое решение.

Технологическое проектирование характеризуется многовариантностью решений, которые удовлетворяют требованиям ТП, поэтому модель (9) перепишем в виде:

$$\begin{cases} \Gamma_{oj} = R_j \\ R_j \in R,\ o_j \in O,\ \Gamma \subseteq O \times R \end{cases}, \quad (10)$$

где R_j – множество допустимых альтернатив решения задачи.

Однако в конкретных производственных условиях почти всегда требуется принять единственное решение $r_j \in R_j$. Для выбора этого решения из множества альтернатив используется мера предпочтения или критерий эффективности (оптимальности) K_o, которые формально можно определить как отношение предпочтения на множество решений: $K_o \subseteq R \times R$. Тогда выражение (10) запишется:

$$\begin{cases} K_o \times \Gamma_{oj} = r_j \\ o_j \in O,\ r_j \in R_j,\ R_j \subseteq R_j \end{cases}. \quad (11)$$

Последняя модель описывает два этапа процесса принятия решений: первый этап – собственно принятие решений, второй – оптимизация решений.

В большинстве задач проектирования ТП соответствие Г невозможно задать только одним из известных способов (функция, алгоритм и т.п.). Это обусловлено двумя причинами: во-первых, недостаточной формализованностью технологической науки, во-вторых, структурной сложностью ТП. Поэтому искомое решение $r_j \in R$ представляется составным:

$$r_j = \left(r_j^1, r_j^2, ..., r_j^\lambda\right), \quad (12)$$

а соответствие Г задается в виде композиции элементарных соответствий, по которым отыскиваются элементарные решения $r^\kappa_j \in r_j$:

$$\Gamma = \Gamma_\lambda \times \Gamma_{\lambda-1} \times ... \times \Gamma_\kappa \times ... \times \Gamma_1, \quad (13)$$

где λ - число выделенных элементарных решений (подзадач).

Выделение множества элементарных решений (12) выполняется на функциональном, параметрическом и структурном уровнях проектирования ТП, соответствующих аспектам системного анализа ТП.

Способ декомпозиции исходной задачи предопределяет метод принятия решений и способ задания соответствий $\Gamma_\kappa \in \Gamma$ в выражении (13).

Моделирование структур ТП

В результате выполнения ППР при проектировании ТП методом адресации к УТП строится математическая структурная модель РТП, которая является основой для параметрического синтеза ТП. Поэтому разрабатываемая математическая модель структуры РТП должна включать в себя перечисленные элементы ТП и Т-процессора, а так же их отношения.

Структура маршрута ТП на конкретное изделие представляет собой строго упорядоченную последовательность операций. Структура маршрута УТП является объединением структур РТП, выполняемых в данном производственном подразделении [3].

Т-системы механообработки обладают многовариантностью состава элементов ТП и еще большей вариантностью структуры. Анализ применяемых в САПР ТП математических моделей для описания и преобразования структур ТП при проектировании показывает, что получаемые с помощью этих моделей описания структур ТП громоздки, требуют указаний об алгоритмах обработки и преобразования данных описаний, чувствительны к изменениям, вносимым при адаптации САПР ТП в производственных условиях [2].

Предложены логико-лингвистические модели, обеспечивающие возможность применения формальных процедур принятия решений, построенных как языковые интерпретаторы. К самым простым и достаточно мощным средствам логико-лингвистического моделирования объектов относятся комбинаторные системы, являющиеся разновидностью дедуктивных формальных систем. Одна из таких систем – формальная грамматика языка.

Рассмотрим построение формальных грамматик для моделирования структуры маршрутного ТП.

Пусть конкретный маршрутный ТП задается последовательностью операций A = (O_1, O_2, …, O_n). Для специальных Т-систем указанная последовательность единственная, а для специализированных и универсальных Т-систем таких последовательностей может быть конечное или бесконечное множество. Обозначим множества последовательных структур маршрутных ТП через L. L = {A}, где |A| ≥ 1. Назовем множество L языком, описывающим структуры маршрутных РТП некоторой Т-системы, а конкретную

последовательность операции $A_j = (O_{1j}, O_{2j}, \ldots, O_{nj})$ – предложением или цепочкой символов в языке L.

Полное множество символов $G_T = \{O\}$, называемое терминальным словарем, интерпретируется как множество операций УТП. Из терминальных символов строятся маршруты конкретных РТП. Понятие "маршрут", являющееся начальным символом или аксиомой грамматики и обозначаемое через S_o, а также некоторые типовые последовательности операций, входящие в разные РТП, образуют нетерминальный словарь G_N, образуются из терминальных с помощью конечного множества правил Р. В общем виде описание языка задается формальной порождающей грамматикой:

$$\varphi = (G_T, G_N, P, S_o). \qquad (14)$$

Каждое правило множества Р задает с помощью операции подстановку нетерминального символа (маршрута или типовой последовательности) через последовательность символов объединенного словаря $G_T \cup G_N$. Правила постановки записываются в виде:

$$A_j \to \psi, \qquad (15)$$

где $A \in G_N$, ψ_j – непустая цепочка символов, составленная из символов объединенного словаря.

Каждый из множества действующих на предприятии УТП описывается своей формальной грамматикой. Множество грамматик образует базу знаний САПР ТП.

Модели УТП, записываемые в виде рассмотренной грамматики, оказываются недостаточно эффективными с точки зрения количества правил подстановки в массиве Р [3]. Поэтому была разработана специальная форма, называемая полупрограммой формальной порождающей грамматикой:

$$\varphi_n = (G_T, G_N, P, S_o, I, M), \quad (16)$$

где G_T, G_N, S_o имеют тот же смысл, что и выражение (14); $I = \{\Gamma_j\}, j = \overline{I,l}$ - множество меток правил подстановки грамматики; $M = \{\Gamma_j\}, i = \overline{I,K}$ - множество меток применяемых правил подстановки; $P = \{P_j\}, j = \overline{I,l}$ - множество правил подстановки, имеющих вид:

$$(\Gamma) A \to \alpha(U), \qquad (17)$$

где $\Gamma \in M$ – метка правил; $A \to \alpha$ - ядро правил подстановки. Оно должно иметь бесконтекстовую форму, то есть $A \in G_N$; α - непустая цепочка символов из словаря $G_T \cup G_N$; U – множество меток неприменяемых правил подстановки $U \subseteq I$ либо $U = \varnothing$.

Множество М совместно с множествами U_1, U_2, …, U_l выполняет функцию управления применения правил подстановки при порождении конкретных предложений языка $L(\varphi_n)$.

Структурные описания ТП в Т-системах ее структурной организацией, а также процедура структурного синтеза ТП механообработки и пример разработки формального описания УТП приведены в работе [3].

В результате процедуры структурного синтеза ТП механической обработки деталей взрывозащищенного асинхронного электродвигателя получены математические модели структуры РТП, сформированные из структур УТП путем алгоритмического преобразования ее математической модели.

Модель УТП, используемая в процессе грамматического вывода, имеет унифицированную структуру данных, которая задается четырьмя списками: Т-список терминальных символов грамматики; N-список нетерминальных символов грамматики; Р-список правки и подстановки; М-список указаний.

Для практического проектирования ТП в САПР разработаны процедуры обработки правил и выбора решений, система отображения геометрической и технологической информации управляющих программ, система организации хранения данных базы знаний.

Проведенные исследования [2,3,4,5] позволили получить следующие результаты и определить приоритетные задачи дальнейших исследований в рассматриваемой области:

1. Разработка САПР ТП для ИАП должна выполняться как гибкая адаптивная система. Адаптивность достигается путем отделения семантической (технологической) составляющей от синтаксической (программной) составляющей САПР. Настройка САПР ТП на конкретные производственные условия и модели оборудования выполняются специальным программным комплексом.

2. Формирование алгоритмической части разрабатываемых адаптивных САПР ТП должно выполняться по принципам и правилам формирования знаний, которые применяются в экспертных системах. Разработана специальная экспертная система, позволяющая оперировать абстрактными понятиями в терминологии для технолога-проектировщика.

3. Разработана подсистема геометрического моделирования процесса механической обработки на станке с ЧПУ. Информация о технологии изготовления детали в виде текста УП отображается на графическом дисплее участками траекторий перемещений режущих инструментов. Настройка моделей типовых циклов обработки применительно к конкретному станку

позволяет модернизировать различные варианты технологических операций.

4. Разработанный метаязык позволяет описывать грамматики языков разнообразных устройств ЧПУ, а также программы синтаксически управляемого транслятора, что обеспечивает настройку САПР ТП на устройства ЧПУ разных моделей.

5. Разработано методическое и программное обеспечение автоматизированных расчетов технологических и конструкторских размерных цепей деталей применительно к траекторным задачам на станках с ЧПУ.

6. Разработаны алгоритмы и программы обработки текстов в формализованных языках устройств ЧПУ и трансляции этих текстов в язык графических примитивов устройства отображения. Декларированный способ задания грамматик входных языков позволяет накапливать и расширять область применения САПР для разнообразных устройств ЧПУ, что обеспечивает гибкость, адаптивность и тиражируемость системы.

7. Разработанные математические, информационные и программные методические средства предполагают возможность создать САПР ТП применительно к произвольной конфигурации ГПС.

Список литературы

1. *Вермишев Ю. Х.* Основы автоматизации проектирования. – М.: Радио и связь, 1988. – 280 с.

2. *Полетаев В. А.* Автоматизированное проектирование технологических процессов в условиях интегрированного машиностроительного производства асинхронных двигателей горных машин: Деп. научн. работы / ВИНИТИ, 1994. - № 2064. – В94. – 201 с.

3. *Полетаев В. А.* Особенности обеспечения качества изделий при автоматизированном технологическом проектировании // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2000. – № 2

4. *Полетаев В. А.* Автоматизированная поддержка производственного цикла создания изделия машиностроения // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2009. – № 5

5. *Полетаев В. А.* Интеграция процессов создания изделий машиностроения // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2009. – № 5

METHODOLOGY OF COMPUTER-AIDED DESIGN OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR INTEGRATED PRODUCTION

Poletaev V. A., D.Sc. (Engineering),
Chicherin I. V., C.Sc. (Engineering), Docent

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

Abstract: The analysis of the implementation of computer-aided design of technological processes for integrated production. An approach to the construction of computer-aided design of technological processes in integrated production on a single mathematical and software, custom applied to any group of CNC equipment.

Keywords: computer-aided design of technological processes, single information space, integrated production.

УДК 620.22:539.374:669.715

О СОЗДАНИИ НОВЫХ ЛЕГКИХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В.К. АФАНАСЬЕВ[1], доктор техн. наук, профессор,
В.А. САМОНЬ[2], инженер,
М.В. ПОПОВА[1], доктор техн. наук, профессор,
С.В. ДОЛГОВА[1], научный сотрудник,
В.В. ГЕРЦЕН[1], научный сотрудник
([1] СибГИУ, г. Новокузнецк, [2] ОАО «ИСС им. академика М.Ф. Решетнева»)

Афанасьев В.К. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
e-mail: in_afanaseva@mail.ru, m.popova@rdtc.ru

Аннотация: В работе представлены закономерности изменения линейного расширения, микроструктуры и механических свойств алюминиево-кремниевых сплавов после пластической деформации. Приведены результаты по деформированным сплавам Al – 15, 20 и 30 % Si, приготовленным в единых условиях. Установлено, что фактором, определяющим величину температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) алюминиево-кремниевых сплавов, является водород. Разработаны способы существенного повышения механических свойств Al-Si сплавов, основанные на изменении содержания в них водорода. В работе рассмотрены перспективы применения разработанных сплавов для нужд космической техники.

Ключевые слова: водород, алюминиево-кремниевые сплавы, термическое расширение, механические свойства, пластическая деформация.

Введение. При рассмотрении перспектив развития легких сплавов для космической техники в достаточной мере рассмотрена целесообразность принять в качестве основы сплавы Al – Si (алусины).

Теперь уже общепринято, что среди традиционных легирующих элементов именно кремний есть тот, который в наибольшей мере пригоден для получения легких алюминиевых сплавов с малым тепловым расширением.

Кремний сильно снижает механические свойства алюминия. Это происходит в связи с образованием хрупких первичных кристаллов, а поэтому сплавы Al – 40…50 % Si (алусины) и тем более сплавы Si - Al (силумины) – это объект несколько отдаленной перспективы.

При разработке сплавов для космоса отправным требованием является получение следующего:

– во-первых, они должны иметь малый термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) по сравнению с имеющимися;

– во-вторых, должен быть получен определенный уровень прочности и пластичности;

– в-третьих, в сочетании с малым удельным весом, другими конкретными физическими свойствами (теплопроводность, электропроводность) они должны быть технологичными;

– в-четвертых, сплавы должны быть в деформированном и термообработанном (стабилизированном) состояниях для исключения решающего влияния внешней среды эксплуатации (изменения температуры, давления и др.) на рабочие свойства.

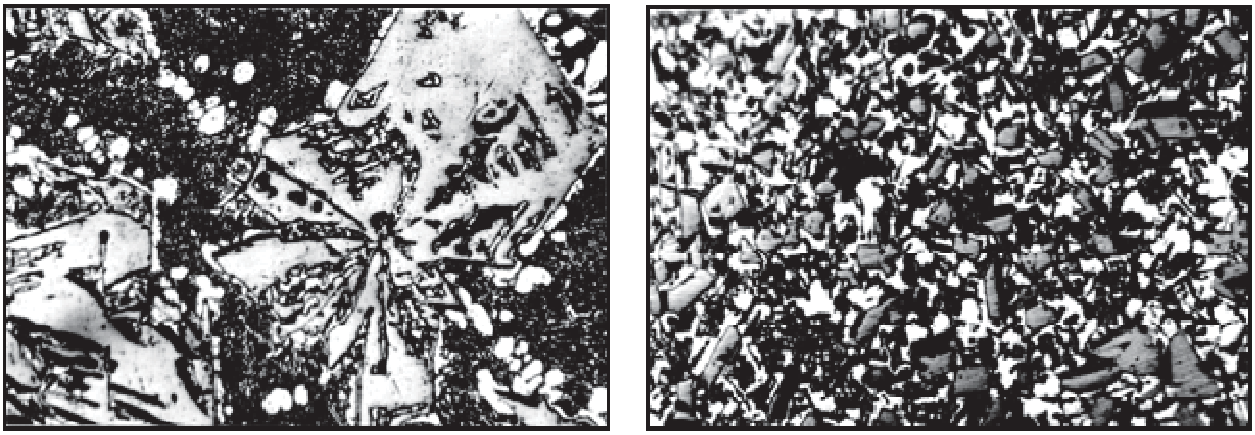
Применение отливок нежелательно, так как, в связи с большой естественной газонасыщенностью, они «распухают» в условиях среднего и высокого вакуума.

Методика экспериментального исследованиия. Все сплавы имеют хрупкие первичные кристаллы кремния, что исключает возможность качественной пластической деформации. Поэтому важным было разработать способ обработки расплава, позволяющий в наибольшей мере измельчить хрупкие выделения кремнистой фазы и тем самым подготовить сплав к восприятию температуры и давления (горячая ковка и прокатка) и только давления – (холодная ковка и прокатка).

Установлено, что в наибольшей мере ТКЛР снижает смесь фосфористой меди и окиси свинца (Cu_3P + PbO) по сравнению с (Cu_3P + CuO), поскольку PbO есть выраженный представитель объектов, построенных на $H^{\pm}$ [1].

Более того, этот модификатор резко повышает механические свойства сплавов перед пластической деформацией. Так, σ_B, МПа / δ, % сплавов изменился для Al – 15 % Si с 110/1,5 до 210/2,5, для Al – 20 % Si с 80/1,0 до 195/2,0 и для Al – 30 % Si с 40/0,3 до 168/1,5.

В качестве примера на рисунке 1 приведена микроструктура сплава Al –30%Si, полученного без и с применением модификатора (Cu_3P + PbO) в количестве 2% от веса расплава.



а б

а – обычное приготовление, б – модифицирование 2 % (Cu_3P + PbO)

Рисунок 1 – Микроструктура сплавов Al – 30 % Si, ×110

Сильное измельчение выделений кремнистой фазы подготавливает металл к пластической деформации.

Разработанный нами способ обработки расплава одновременно резко измельчает первичные выделения кремнистой фазы, повышает механические свойства и в наибольшей мере по сравнению с известными снижает ТКЛР до $\alpha = 15{,}0 \div 16{,}0 \div 16{,}5 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$ при 50–100–150 ºС для сплавов Al–15, 20 и 30 % Si соответственно, что равносильно увеличению содержания кремния до 30 %.

В последующем это позволило провести качественную горячую и холодную пластическую деформацию в условиях Сибирского металлургического института и ОАО «ЗСМК».

Из деформированных заготовок вырезались образцы для дилатометрического анализа и определения механических свойств в сыром и термически обработанном состояниях.

Установлено, что совмещение горячей ковки с последующей холодной на сплаве Al –15%Si позволяет получить первые низкие значения ТКЛР
$\alpha = 7–4 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$.

Для сплава Al – 20 % Si при этих же температурах испытания ($t_{исп.}$= 150–200 °С) тоже наблюдается аномалия ТКЛР, но минимальные значения здесь выше – $\alpha = 10–8{,}5 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$, несмотря на большее содержание кремния. Это еще раз подтверждает водородный механизм теплового расширения.

В [2] впервые было указано, что основным химическим элементом, формирующим тепловое расширение сплавов Al –Si, является не кремний, а водород. Именно поэтому наибольшее измельчение кремнистой фазы за счет введения в расплав водорода при получении слитков, пластической деформации [3] и термической обработке может быть получено с помощью различных наводороживающих воздействий на расплав во время и после модифицирования.

На рисунке 2 приведены результаты определения ТКЛР на образцах холоднокатаного сплава Al –15%Si, но приготовленного уже в условиях наводороживания без применения модификаторов.

Прежде всего, установлено, что выстаивание расплава в атмосфере водяного пара позволяет получить самые низкие значения ТКЛР при $t_{исп}$=150 – 250 °С. Такие значения $\alpha = 1{,}8 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$ являются идеальными для алюминиевых сплавов космической техники.

Однако, эти низкие значения ТКЛР требуются для рабочих температур 50–150 °С и поэтому приведенное здесь указывает лишь на принципиальную способность алюминиевых сплавов иметь такой же низкий ТКЛР, как у тяжелых и дорогих инваров (Fe - Ni).

Особо следует отметить впервые установленные обстоятельства, что низкие значения ТКЛР можно получать и при гораздо меньших степенях холодной прокатки (ε = 38, 46 и 73%), но только в том случае, если расплав после модифицирования выстаивался в атмосфере водяного пара. Низкие значения ТКЛР получаются только при модифицировании и выплавке сплава в атмосфере водяного пара (АВП).

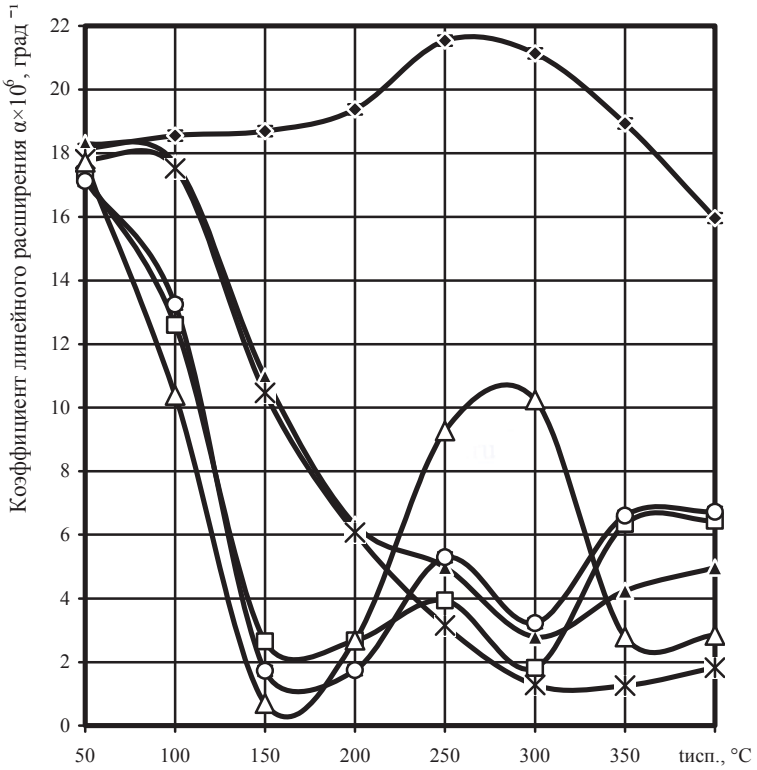


Рисунок 2 - Влияние степени пластической деформации на линейное расширение холоднокатаного сплава Al – 15 % Si (модифицирование 2 % (Cu3P + PbO), выстаивание в атмосфере водяного пара, 920 ºС, 45 мин). Степень деформ., % / содержание водорода (см^3/100г)

0/0,3 38/0,5 46/0,8 73/1,4

Важнейшим вопросом при получении слитков и последующей их деформации для достижения низких значений ТКЛР является выбор нужных условий охлаждения. Изменение условий приготовления, заключающееся в смене выстаивания в атмосфере водяного пара на продувку расплава водяным паром с целью сокращения времени приготовления, устраняет очень нужную для космических аппаратов низкотемпературную аномалию и резко снижает ТКЛР до α=1,8–3,0·10^{-6} град$^{-1}$ при $t_{исп}$= 350–400 °С.

Получение низких значений ТКЛР деформированных сплавов при высоких $t_{исп}$ очень важно, и сведения об этом будут нужны при разработке композиций жаропрочных сплавов различного целевого назначения.

Установлено, что даже при ε = 93% минимальные значения ТКЛР сплава Al–20%Si выше, чем у сплава Al–15%Si. Однако, увеличение времени выстаивания расплава в атмосфере водяного пара с 15 до 45 мин. при 920 °С позволяет получить у холоднокатаного сплава Al–20% Si наиболее низкие значения α=0,7·10^{-6} град$^{-1}$ при $t_{исп}$=150–200°С.

Увеличение количества случаев получения α = 0,7÷1,8÷2,3÷3,0·10^{-6} град$^{-1}$ позволяет считать, что действительно с помощью представлений о ведущей роли водорода в формировании свойств может быть решена проблема получения алюминиевых инваров.

Повышение содержания кремния до 30%, несмотря на появление возможности качественно его ковать и прокатывать, не позволило получить низкотемпературную аномалию ТКЛР даже при $t_{исп}$=150–250°С и низкие значения коэффициента при 400–450°С, что дополнительно подтверждает положение о том, что творцами всех свойств являются водород, азот и кислород, а остальные элементы – носители их [4, 5]. Появление возможности получения качественной деформированной заготовки высококремнистого хрупкого сплава (σ_B = 40 МПа, δ = 0 %) свидетельствует о перспективе повышения содержания кремния в сплавах для уменьшения их удельного веса.

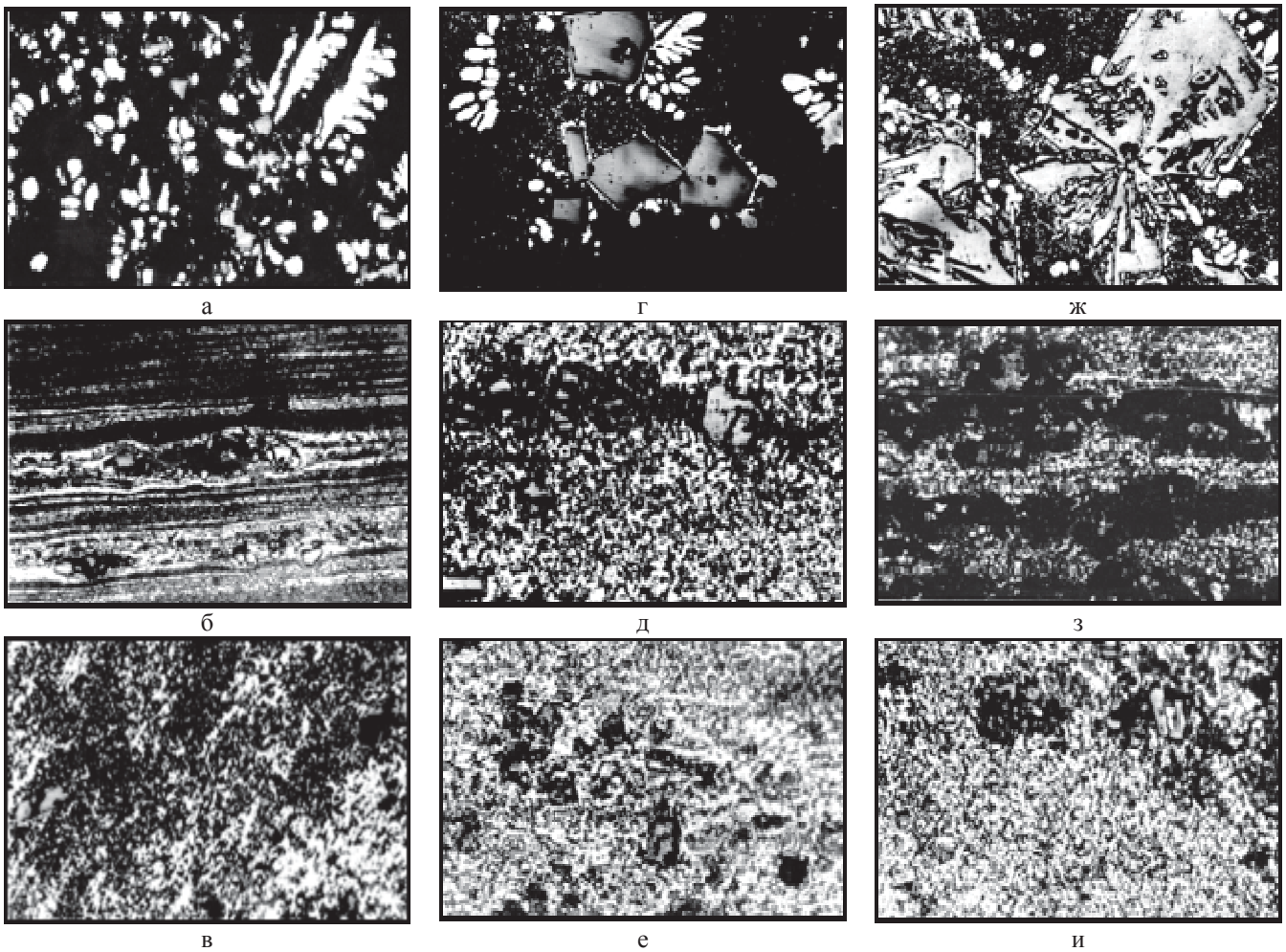
После получения качественных поковок и листа актуальным становится вопрос о механических свойствах.

Результаты и обсуждение

На рисунке 3 показана микроструктура отливок, листа и поковок из изучавшихся сплавов. Видно, что деформация уничтожает литую структуру с увеличением объемной доли эвтектики и уменьшением объемной доли твердого раствора. Установленное с помощью количественного металлографического микроскопа «Эпиквант» приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Объемная доля структурных составляющих и содержание водорода в сплавах Al–Si в зависимости от их состояния

Состояние сплава	Al – 20 % Si				Al – 30 % Si			
	Si, %	эвт., %	тв. р-р, %	[H], $см^3$/100 г	Si, %	эвт., %	тв. р-р, %	[H], $см^3$/100 г
литой (модифицирование)	42,7	37,5	19,8	1,8	30,8	57,8	11,4	1,5
прокат, ε = 50 %	19,6	79,2	4,2	3,1	21,9	71,9	4,2	3,6
прокат, ε = 70 %	10,1	89,4	0,5	4,3	21,7	76,4	1,9	5,0



а, б, в – Al - 15 % Si, *г, д, е* – Al - 20 % Si, *ж, з, и* – Al - 30 % Si;
а, г, ж – микроструктура сплавов в литом состоянии, *б, д, з* – прокат, ε = 92 %, *в, е, и* – поковки, ε = 92 %
Рисунок 2 – Микроструктура сплавов системы алюминий – кремний в литом и деформированном состоянии ×110

У всех сплавов после проката наблюдается полосчатость, состоящая из эвтектики и мелких остатков первичных кристаллов. Видно явное преимущество кованых сплавов, которые имеют более равномерную структуру после деформации. Это определяет уровень механических свойств (таблица 2). Прокат с большой ε,% несколько повышает прочность ($\sigma_в$) и снижает пластичность (δ). Традиционный отжиг (550°С, 10 ч) проката дополнительно повышает эти свойства.

Самые высокие механические свойства получаются после ковки, которая придает всем сплавам наибольшую прочность и пластичность даже без последующей термической обработки.

Повышение пластичности проката достигается не только с помощью отжига, но и закалки с 550°С после выдержки в течение 3 и 5 ч. Относительное удлинение (δ,%) сплава Al – 15%Si увеличивается с 1,9% (прокат) до 13,4 – 14,5% (прокат + закалка).

Таблица 2 – Влияние обработки на механические свойства сплавов Al–15÷30% Si

Вид обработки	Механические свойства сплавов					
	Al – 15 % Si		Al – 20 % Si		Al – 30 % Si	
	$\sigma_В$, МПа	δ, %	$\sigma_В$, МПа	δ, %	$\sigma_В$, МПа	δ, %
литой (модифицированный)	166	2,2	145	1,6	120	0,5
прокат	ε = 94 %		ε = 91 %		ε = 89%	
	186	0,7	198	0,2	130	0,1
отжиг после проката 500 ºС, 10 ч	216	8,2	217	5,6	161	2,3
кованый, ε = 94 %	**256**	**6,6**	**238**	**5,2**	**215**	**3,0**

Длительный нагрев при 550°С, 20 ч (печь) снижает прочность с 200 МПа до 105, а пластичность увеличивается с 1,9 до 15,1%. Этому соответствует структура пережога. До пережога повышение пластичности не сопровождается существенным изменением микроструктуры.

С позиций прочниста и деформатора такие результаты можно считать выдающимися, а получены они, исходя из следующих весьма необычных соображений.

Вся металлургия работает в атмосфере Земли.

Атмосфера эта составляет кокон, отделяющий нас от открытого Космоса, но, в то же время, состоящий из воздуха и водяного пара, так как 2/3 суши Земли занято водой с вытекающими отсюда последствиями («круговорот», дожди, грозы, молнии и пр.). Поэтому атмосферу Земли (кокон) надо называть на техническом языке атмосферой водяного пара (АВП).

Общеизвестно, что влажный водяной пар является основным поставщиком водорода в металлы и сплавы.

Другими словами, все, что производится в металлургии с применением плавления, содержит водород, поглощенный из АВП.

Согласно [6] все металлы состоят из H^+, H^- и $H^{\pm}$, но эти водороды составляют конструкцию металла.

Эта конструкция гармонична и обычно представляется как «идеальное кристаллическое построение», имеющее вид «идеальной кристаллической решетки».

Металлы идеального построения взаимодействуют между собой также гармонично. Эта гармония выражается в виде равнобедренного треугольника и в виде упрощенной диаграммы состояния с неограниченной растворимостью – «сигары».

Поглощенный из АВП жидкими и твердыми металлами и сплавами водород $H^-_{изб}$ нарушает эту гармонию. Это, в свою очередь, создает дефектность их строения, а потому все земное, сделанное руками человека-металлурга на Земле, имеет дефектное построение по сравнению с идеальным космическим (рисунок 4). И как следствие этого, реальные свойства металлов и сплавов существенно ниже теоретических, что объясняется дефектностью «кристаллического построения».

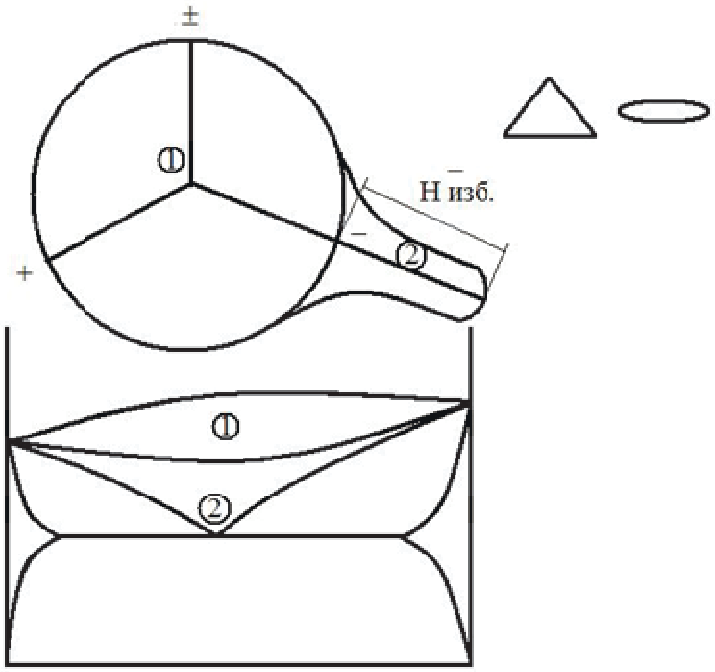


Рисунок 4 – Гармоничное и ангармоничное развитие трех водородных реакций: 1 – космическое (вакуум), 2 – земное (АВП)

Этот $H^-_{изб}$ (АВП) есть всегда, как всегда есть влажная атмосфера Земли, именно он и оказывает решающее «наследственное» влияние на все свойства металлов и сплавов.

Попытки избавиться от АВП и перейти к вакууму не увенчались успехом из-за технических трудностей при получении хотя бы среднего вакуума (10^{-6} – 10^{-8} мм рт. ст.) в промышленных условиях. Известно, что в Космосе остаточное давление составляет 10^{-16} мм рт. ст, и окружающая температура: –250 ºС.

Выводы. Полученные результаты по сплавам Al–15÷30% Si позволяют утверждать, что:

1. Горячая пластическая деформация (совместное приложение давления и температуры) переводит первичные кристаллы Si в мелкодисперсное состояние («эвтектику»). Водород ($H^-_{изб}$), бывший в шихтовом Si, при нагреве деформируемого сплава уходит в атмосферу.

Поэтому для горячего проката и поковок характерны более высокие механические свойства (особенно поковок) и аномально низкие значения ТКЛР (α до уровня $8 \div 10 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$) по сравнению с литым состоянием. Приготовление сплавов в атмосфере водяного пара существенно усиливает действие горячей деформации и приводит к появлению еще больших аномалий ТКЛР со значениями инваров $\alpha = 0{,}7 \div 1{,}8 \div 3{,}2 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$.

2. Приложение только давления без нагрева (холодная пластическая деформация) увеличивает содержание водорода, остающегося в металле, и снижает ТКЛР в большей мере по сравнению с горячей деформацией.

Интенсивная холодная прокатка одного и того же «малокремнистого» заэвтектического сплава Al – 15 % Si в сочетании с обработкой расплава влажными асбестовыми тампонами приводит к получению самых низких значений ТКЛР в рабочей области температур испытания.

Поэтому можно считать, что холодная пластическая деформация – это деформация, увеличивающая количество водорода, а горячая – уменьшающая. С этих позиций была разработана серия деформируемых сплавов, очень близких к конечному результату – низким значениям ТКЛР при $t_{исп}$ 50-100-150ºС с требуемым уровнем механических и других свойств.

Проведенная работа позволяет сделать заключение, что создание легких сплавов для Космоса должно идти по пути все более широкого применения водорода как главного фактора, определяющего все свойства металлических материалов. В первую очередь, это касается значений ТКЛР и механических свойств.

Созданные сплавы в деформированном состоянии без окончательной термической обработки уже сейчас имеют достаточный уровень свойств, необходимых для успешной работы в космических аппаратах.

Список литературы

1. *Афанасьев В.К.* Водородная платформа периодической системы элементов. Часть II / В.К. Афанасьев // Металлургия машиностроения. – 2012. - №4 – С. 3-7.

2. *Афанасьев В.К.* Водородная платформа металлургии XXI века / В.К. Афанасьев, Р.С. Айзатулов, Ю.А. Селезнев // Сборник трудов VII Международной конференции «Водородное материаловедение и химия гидридов металлов», Алушта, Крым, Украина. –2001. – С. 428-429.

3. *Афанасьев В.К.* О природе процессов пластической деформации сплавов Al–1…50% Si / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.В. Горшенин, С.В. Долгова, В.В. Герцен // Металлургия машиностроения. – 2014. – № 3. – С. 2–9.

4. *Афанасьев В.К.* Некоторые итоги и перспективы металлургии // Литейное производство. – 2000. – №3. – С.3-5.

5. Физика космоса. Маленькая энциклопедия / Гл. редактор Р.А. Сюняев. – М.: «Советская энциклопедия», 1986. – 783 с.

6. *Афанасьев В.К.* Водородная платформа периодической системы элементов // Металлургия машиностроения. – 2011. – №2 – С. 21-26.

ABOUT CREATION OF NEW EASY DEFORMABLE ALLOYS FOR SPACE EQUIPMENT

Afanasyev V.K.[1], Dr. Sc. (Engineering), Professor, e-mail: in_afanaseva@mail.ru
Samon V.A.[2], engineer of JSC «Information Satellite Systems name of the academician M. F. Reshetnyov», e-mail: va_samon@mail.ru
Popova M.V.[1], Dr. Sc. (Engineering), Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru
Dolgova S.V.[1], research associate, e-mail: sv_dolgov@mail.ru
Herzen V.V.[1], research associate, e-mail: vv_herzen@mail.ru

[1]Siberian state industrial university, 42 Kirov str., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation
[2] JSC «Information Satellite Systems name of the academician M. F. Reshetnyov», Lenin St., 52, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, 662972, Russian Federation

Abstract: Authors provide results of influence of plastic deformation on linear expansion, a microstructure and mechanical properties of aluminum-silicon alloys of Al in article – 15, 20 and 30% of Si. Authors give results of the quantitative microstructural analysis of the deformed alloys of Al-20% Si and Al–30 %Si. Authors show that the factor determining the size of the temperature coefficient of linear expansion (TCLE) of aluminum-silicon alloys before plastic deformation is hydrogen. For hot hire and forgings higher mechanical properties and abnormally low values of TCLE (α to level $8\text{-}10 \cdot 10^{-6}$ ºС$^{-1}$) in comparison with a cast state are characteristic. The ways of essential increase of mechanical Al-Si properties of alloys based on change of the content of hydrogen in them are developed. In work prospects of application of the developed alloys for space equipment are considered.

Keywords: hydrogen, thermal expansion, mechanical properties, plastic deformation, aluminum-silicon alloys, invar, thermal expansion.

УДК 621.923

ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Л.М. АКУЛОВИЧ,
Л.Е. СЕРГЕЕВ,
Е.В.СЕНЧУРОВ

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»»
220023, Республика Беларусь, г. Минск, проспект Независимости, 99
senchurov@tut.by

Аннотация: В статья рассмотрен метод магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей деталей машин из магнитных и немагнитных материалов. Предложено использование предварительной и окончательной обработки для обеспечения роста производительности и качества процесса.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, ферроабразивный порошок, шероховатость, магнитная индукция, шлифование

Введение. Растущие требования к повышению производительности машин и появление металлообрабатывающего оборудования с расширенными технологическими возможностями обуславливают использование в конструкциях деталей с плоскими поверхностями. Современный уровень развития техники характерен существенным увеличением диапазона и усложнением форм используемых рабочих поверхностей деталей и одновременным повышением требований к точности их обработки. Во многих случаях только повышение точности размеров рабочей поверхности детали позволяет получить новые свойства, расширить функциональные возможности, увеличить надежность, ресурс, к.п.д. и улучшить другие эксплуатационные характеристики машин в целом.

Одним из финишных способов, отвечающим в достаточно большом объеме предъявленным требованиям, является процесс магнитно-абразивной обработки (МАО) [1]. МАО изделий из тонколистового материала (толщина ≤ 5 мм) позволит устранить ручной труд на операции полирования и уменьшить количество операций, рис. 1 [2].

Теория. Процесс обработки осуществляется под воздействием сил, которые могут быть рассчитаны по зависимостям, приведенным в работе [3]. Однако при расчетах следует учитывать, что поле, возникающее вследствие внешнего намагничивания является суммарным полем дополнительной ферромагнитной массы и обрабатываемого изделия. Если обрабатываемое изделие изготовлено из немагнитного материала, расчетный рабочий зазор будет равен:

$$\delta_1 = (\delta + \theta),$$

где δ - рабочий зазор, мм;
θ - толщина обрабатываемого изделия, мм.

Нормальная магнитная сила , создающая усилия на выступах частиц порошка:



Рисунок 1 - Магнитно-абразивная обработка плоскостей

$$F_3' = -\frac{He^2}{m} b^4 \cdot \frac{(M_{3д}-1)^2}{4\pi \cdot 7{,}8^2} \left\{ 1 + \frac{(M_{3д}-1)}{7{,}8} \cdot \frac{b^4}{3} \left[\frac{n_1}{(b^2+x^2)} + \frac{n_2}{(b^2+4x^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \right\} \times$$
$$\times \left[\frac{n_1 x}{(b^2+x^2)^{\frac{5}{2}}} + \frac{4n_2 x}{(b^2+4x^2)^{\frac{5}{2}}} \right] \cdot (M_д - 1)^2 \cdot \left(1 - \frac{N_д}{4\pi} \right)^2, \quad (1)$$

где: *He* – внешнее поле, Т;

b - радиус частиц порошка, условно принятого в виде описанной сферы, мм;

x - расстояние между соседними частицами порошка, мм;

$N_д$ - баллистический коэффициент размагничивания для дополнительной ферромагнитной массы;

m - число выступов частиц порошка одновременно находящихся в контакте с обрабатываемой поверхностью;

n_1 и n_2 - количество зерен в первом и втором слоях, окружающих рассматриваемое зерно;

$M_{3д}$ - магнитная проницаемость частиц порошка в поле, создаваемом дополнительной ферромагнитной массой ,мГ/м;

$M_д$ - магнитная проницаемость дополнительной ферромагнитной массы, мГ/м.

Если величина внешнего поля в процессе обработки не меняется, то процесс диспергирования металла ферромагнитно-абразивными частицами порошка осуществляется под воздействием постоянной магнитной силы. Схема сил при микрорезании, приведенная в работе [3], позволяет с учетом механической составляющей силы трения рассчитать тангенциальное усилие F_z'

$$F_z' = \frac{\bar{F}_3}{m} \sin\delta \left(\operatorname{ctg}\delta - \frac{f_i}{b} \right) \quad (2)$$

и нормальное усилие F_y:

$$F_y = \frac{\bar{F}_3}{m} \sin\delta \left(1 + f_i\right), \quad (3)$$

где: $f_м$ - механическая составляющая коэффициента трения;

δ - угол резания, град.

В условиях упругого контакта:

$$f_{i,y} = 0{,}418\alpha \sqrt{\frac{h}{\tau}}. \quad (4)$$

В условиях пластического контакта:

$$f_{i,n} = 0{,}55 \sqrt{\frac{h}{\tau}}, \quad (5)$$

где; *h* - глубина внедрения единичной неровности в обрабатываемую поверхность, мм;

τ - радиус единичной неровности на поверхности абразивной частицы порошка, мм;

α - коэффициент гистерезисных потерь при скольжении по материалу сферы, определенный по одноосному растяжению-сжатию.

Результаты и обсуждение. Результаты электронно-микроскопических исследований позволяют приближенно оценить радиус округления τ выступов микрорельефа, колеблющейся в довольно широких пределах - от 0,3 до 2 мкм [1]. Глубину внедрения единичного выступа можно оценить по размерам снимаемой стружки. При магнитно-абразивной обработке 55 - 75% всех стружек имеет длину до 4 мкм, а отношение длины к ширине равно 5 , рис. 2.

Экспериментальные исследования магнитно-абразивной обработки деталей, изготовленных из листового материала толщиной 1 – 2 мм с последующим шлифованием проводили на станке для МАО плоскостей.

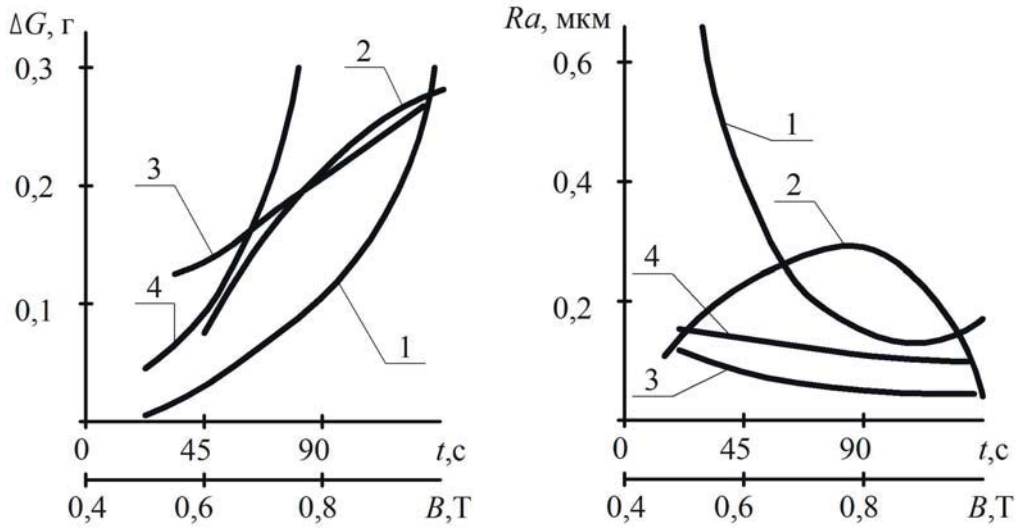
Поверхность после операции шлифования кругом 1 200×25×51 25А 10П СМ2 6 К1А 35 м/с А1 ГОСТ 2424-83 имеет шероховатость *Ra* = 1,25 – 1,6 мкм. Изделие устанавливали на оправке из ферромагнитного материала без зазоров.



а б

Рисунок 2 –Форма стружек (а) и следы микрорезания (б) после МАО

Параметры и режимы обработки методом МАО: величина магнитной индукции, B = 0,8 – 1,2 Т; скорость резания, $V_р$ = 1,0 - 1,5 м/с; скорость осцилляции, $V_о$ = 0,1 - 0,2 м/с; амплитуда осцилляции, A = 1 - 2 мм; размерность феррообразивного порошка (ФАП) Δ = 100/160 мкм; ФАП - Ж15КТ ТУ 6-03-09-483-81, смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС) – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5% водный раствор, капельная подача, удельный расход 100 - 150 мл/мин; величина рабочего зазора, δ = 1 мм; коэффициент заполнения рабочего зазора, $К_з$ = 1. Зависимость массового съема металла ΔG с поверхности изделий из бронзы БрАЖ9-4 ГОСТ 18175-78 (кривые 1, 2) и стали 10 ГОСТ 1050-88 (кривые 3, 4) от магнитной индукции B в рабочем зазоре и от продолжительности обработки t показаны на рис. 3 а, Такие же зависимости для шероховатости Ra показаны на рис. 3 б.



а) б)

Рисунок 3 - Зависимость массового съема металла ΔG (а) и шероховатости поверхности Ra (б) от магнитной индукции B (линии 2 и 4) в рабочем зазоре и от продолжительности обработки t (линии 1 и 3)

Для образцов из стали 10 предварительно была проведена обработка в течение 20 с при B = 1,2 Т, а окончательная обработка осуществлялась при B = 0,8 Т в течение 30 с. На рис. 3 а и 3 б этому режиму соответствуют линии 3. Линиям 4 соответствуют следующие режимы МАО: предварительно - B = 1,1 Т в течение 30 с , а окончательно - B = 0,9 Т в течении 30 с. Дальнейшая обработка данных образцов в течение 45 – 60 с сопровождается увеличением съема металла и снижением шероховатости до Ra =0,1 - 0,2 мкм.

При обработке образцов из бронзы при B = 1,1 Т увеличение времени обработки свыше 60 с приводит к росту съема материала и шероховатости поверхности, что связано со скрыты-

ми дефектами поверхностного слоя и шаржированием частицами ФАП.

При $B < 1{,}0$ Т времени обработки 60 с и более происходит уменьшение шероховатости, что объясняется устранением дефектов исходной поверхности и образованием микропрофиля, характерного для МАО.

Выводы. Таким образом, повышение производительности и качества обработки плоских поверхностей деталей машин из различных материалов обеспечивается использованием предварительной ($B \geq 1{,}1$ Т; $t = 20$ -30 с) и окончательной ($B < 1{,}0$ Т; $t = 60$ с)

Список литературы

1. *Сакулевич, Ф.Ю*. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич – Минск: Наука и техника, 1981. - 326с.

2. *Кудинова, Э.Н.* Магнитно-абразивная обработка изделий из тонколистового материала / Э.Н. Кудинова // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук, 1984. – №4. – С. 52–55.

3. *Скворчевский, Н. Я.* Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н.Я. Скворчевский и [др.]. – Минск: Навука і тэхніка, 1991 - 216 с.

THE TECHNOLOGY OF MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING OF FLAT SURFACES OF MACHINE PARTS

Akulovich L. M.,
Sergeev L.E.,
Senchurov E. V.

Belarusian State Agrarian Technical University
220023, 99/1, Nezavisimosti av., Minsk, Republic of Belarus, e-mail: senchurov@tut.by

Abstract: In the article the method of magnetic-abrasive machining of flat surfaces of machine parts from magnetic and non-magnetic materials. Suggested usage prior and final processing to ensure productivity and the quality of the process.

Keywords: magnetic and abrasive processing, ferroabrazivny powder, roughness, magnetic induction, grinding

УДК 621.9.047/048

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ТОПОГРАФИЮ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ

Н. В. БЕКРЕНЕВ,
И. В. ЗЛОБИНА
(СГТУ, г. Саратов, Россия)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77
nikolaj.bekrenev@yandex.ru, irinka_7_@mail.ru

Аннотация: Установлено образование на поверхности стальных заготовок при воздействии колеблющегося с ультразвуковой частотой индентора регулярных наноструктур, формирующих однородный микрорельеф, отличающийся меньшей фрактальной размерностью по сравнению с исходным. Показана возможность образования на термообработанных заготовках ориентированного микрорельефа, позволяющего улучшить условия контактного взаимодействия деталей типа сопрягаемых пар.

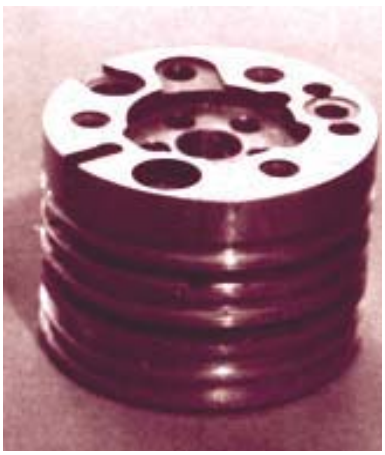
Ключевые слова: регулярные наноструктуры, ультразвук, фрактальная размерность, контактное взаимодействие, топография поверхности

Введение

В современных условиях конкуренции на рынке производства деталей перспективных агрегатов и топливной аппаратуры летательных аппаратов и наземного транспорта, выполненных из высокопрочных легированных сплавов и сталей, определяющим требованием к сопрягаемым парам (рис. 1) становится повышение надежности и долговечности сохранения функциональных характеристик, во многом зависящих от сохранения величины зазора в сопряжении и определенного микрорельефа [1, 2].



а



б

Рисунок 1 - Типовые представители прецизионных деталей топливной аппаратуры: гильза золотниковой пары (а), корпус аксиального плунжерного насоса (б)

При этом величины зазоров согласно требованиям снижаются до 1-3 мкм, а требования к шероховатости ограничиваются 0,06-0,08 мкм по параметру Ra, т.е. входят в наноразмерный диапазон величин. Стабилизировать эксплуатационные характеристики сопрягаемых пар возможно путем формирования на их поверхностях регулярного микрорельефа, что представляет определенные трудности вследствие хаотичности микрорезания, составляющего сущность процессов абразивно-алмазной доводки. Сообщение доводочному инструменту ультразвуковых колебаний малой амплитуды позволяет формировать на поверхности детали вместо

стохастичного регулярный микрорельеф, особенности которого коррелируют с направлением вектора колебаний [3]. Однако, в области сверхмалых значений, приближающихся к нанодиапазону, влияние ультразвука на обработанную поверхность не исследовалось.

Методика экспериментального исследования

Нами исследовалось формирование микрорельефа на образцах из стали 45 (в состоянии поставки и закаленных до твердости $HRC_Э$=35…38) при воздействии инструмента с алмазосодержащим покрытием со статическим усилием 0,5 Н, что соответствует чистовым режимам алмазной доводки или выглаживания. Инструменту сообщали ультразвуковые колебания частотой 22 кГц и амплитудой 3-5 мкм перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Микрорельеф до и после обработки изучали при помощи атомносилового микроскопа СММ-2000 (рис. 2) с определением фрактальной размерности и построением трехмерной топографии. Результаты представлены на рис. 3 и в табл. 1.



Рисунок 2 - Атомносиловой микроскоп СММ-2000

Таблица 1 Фрактальная размерность стали 45 без термообработки и после закалки

	Фрактальная размерность			
	Исходное состояние, Fисх.	После у/з обработки, Fобр.	Среднее значение, Fср.	Fисх.-Fобр. = ΔF
Сталь 45 (в состоянии поставки)	1,0311±0,001	1,0026±0,000102	1,0182/ 1,0092	0,0285
Сталь 45 (после закалки)	1,0265±0,000694	1,0094±0,000495	1,0284/ 1,0024	0,0171

Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Топография поверхности нетермообработанной стали 45 отличается чрезвычайным разбросом величин элементов микрорельефа в нанодиапазоне. После силового воздействия колеблющегося с ультразвуковой частотой инструмента топография существенно сглаживается. При этом величина фрактальной размерности снижается на 3%, но разброс величин размерности для отдельных элементов микрорельефа уменьшается на порядок.

Термообработанная сталь 45 характеризуется большей сглаженностью и несколько меньшей фрактальной размерностью. После ультразвуковой обработки на поверхности образуются волнообразные структуры с плавными обводами, что может считаться благоприятным как для формирования опорной поверхности профиля, так и для образования «карманов» для размещения смазки в зоне трения элементов пары. Фрактальная размерность такой поверхности

имеет разброс значений для различный элементов микрорельефа, меньший на 40% относительно необработанной.

Выводы

Таким образом, малоамплитудная ультразвуковая обработка позволяет формировать регулярный микрорельеф поверхности и в нанодиапазоне величин, что обеспечивает стабильное обеспечение требуемых качественных показателей сопрягаемых пар перспективных изделий агрегатостроения.

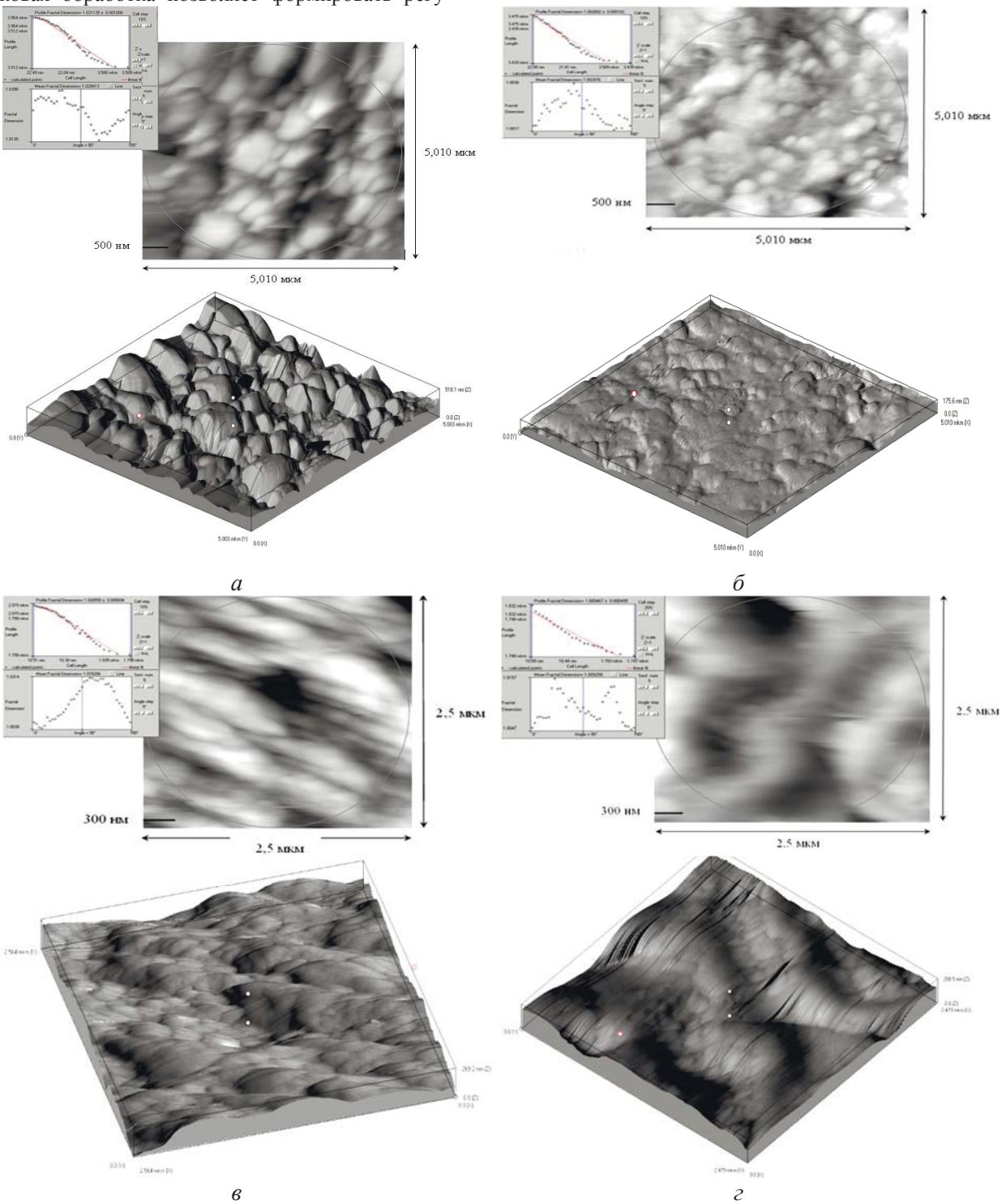


Рисунок 3 - Фрактальная размерность, микрорельеф и 3-D топография поверхности стали 45 в состоянии поставки (а, б) и после термообработки (в, г) необработанной (а, в) и после ультразвукового воздействия (б, г)

Список литературы

1. Материаловедение и технология металлов: Учеб. для студентов машиностроит. Спец. вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др.: под ред. Г.П. Фетисова – 6 изд., доп. – М.: Высш. Шк., 2008. – 877 с.

2. Высокопрочные коррозионно-стойкие стали в современной авиации / науч. ред. А.Г.Братухин. – М.: изд-во МАИ, 2006. – 656 с.

3. *Бржозовский Б.М.* Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие / Б.М.Бржозовский, Н.В. Бекренев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. -348 с.

INFLUENCE OF ULTRASOUND ON TOPOGRAPHY OF THE SURFACE OF CONSTRUCTIONAL MATERIALS AT THEIR FINISHING PROCESSING

Bekrenev N. V.,
Zlobina I. V.

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77 Politechnicheskaya street, Saratov, Russia, 410054
nikolaj.bekrenev@yandex.ru, irinka_7_@mail.ru

Abstract: Education on a surface of steel preparations at influence of the indentor of the regular nanostructures forming the uniform microrelief differing in smaller fractal dimension in comparison with initial fluctuating with an ultrasonic frequency is established. Possibility of education on the thermoprocessed preparations of the focused microrelief allowing to improve conditions of contact interaction of details like the interfaced couples is shown.

Keywords*:* regular nanostructures, ultrasound, fractal dimension, contact interaction, surface topography

УДК 621.9.047/048

ОБОСНОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОДИСПЕРСНЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ДРОБЛЕНИЕМ АГЛОМЕРАТОВ

Н. В. БЕКРЕНЕВ,
И. В. ЗЛОБИНА,
А. П. ПЕТРОВСКИЙ
(СГТУ, г. Саратов, Россия)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77
nikolaj.bekrenev@yandex.ru, irinka_7_@mail.ru

Аннотация: Приведены результаты экспериментальных исследований получения неметаллических микропорошков ультразвуковым дроблением исходных макроагломератов гидроксиапатита и стекольной шихты на частотах 22 и 44 кГц, показавшие существенное повышение однородности гранулометрического состава пробы по сравнению с механическим помолом, а также образование более симметричной формы частиц, что позволит улучшить качество формируемых прессованием, спеканием, 3-D печатью или напылением изделий за счет повышения однородности их физико-механических свойств.

Ключевые слова: ультразвук, гранулометрический состав, однородность, дробление, технологическая схема, сфероидизация.

Введение

В современной технологии получения материалов различного назначения находят широкое распространение металлические и неметаллические микропорошки, использование которых позволяет формировать сложнопрофильные конструкции в случае невозможности или нежелательности применения литья. Микропорошки являются основой получения различных видов керамики (конструкционной, пьезоэлектрической), а также изделий, формируемых методами *3-D* печати. В настоящее время существует достаточно много методов и технологий получения микродисперсных порошков: обработка резанием, измельчение в шаровых, вибрационных и планетарных мельницах, измельчение ультразвуком в жидких средах (диспергированием), электроимпульсный метод, распыление газовым потоком, физико-химический метод.

Механическим измельчением можно превратить в порошок практически любой металлический или керамический материал. Существующие механические процессы подготовки порошков не обеспечивают достаточной однородности гранулометрического состава и отличаются трудоемкостью вспомогательных операций (рассев и др.). При этом технологический процесс получения порошков в данном диапазоне не позволяет контролировать форму частиц порошка. Специальные методы получения микродисперсных порошков: ультразвуковое диспергирование в растворах, распылительная сушка, криохимическое осаждение позволяют получать порошки порядка от 0,1 до 1000 мкм. Данные технологии позволяют получать порошки из частиц сферической формы, но их гранулометрический разброс находится пределах 40%.

Теория

Однако проблема заключается в трудности получения существующими методами порошка со стабильным гранулометрическим составом частиц в пределах от 5% до 25%. При этом технологические процессы получения неметаллических порошков не позволяют контролировать форму частиц.

Нами проведены исследования, результаты которых позволяют сделать вывод о возможности повышения степени однородности гранулометрического состава неметаллических микропорошков путем ультразвукового дробления исходных агломератах на определенных режимах вибрационного воздействия.

Сравнивались два метода измельчения порошка: механическое дробление в мельнице и ультразвуковое диспергирование путем силового воздействия пуансона, колеблющегося с ультразвуковой частотой, закрепленного в пьезокерамическом преобразователе специальной установки.

Частота ультразвука составляла 22 кГц и 44 кГц. Изменение частоты обеспечивали сменными преобразователями и включением в схему питания задающего генератора ГЗ-33, амплитуду регулировали изменением выходной мощно-

сти генератора, усилие прижима пуансона – тарированной пружиной. Полученный помолом в и ультразвуковым методом порошок исследовали на компьютерном анализаторе изображений микроструктур АГПМ-6М. Оценивали зависимость размеров частиц порошка и их дисперсии от параметров процесса диспергирования. Исходным материалом являлась стекольная шихта со средним размером фрагментов 5 мм.

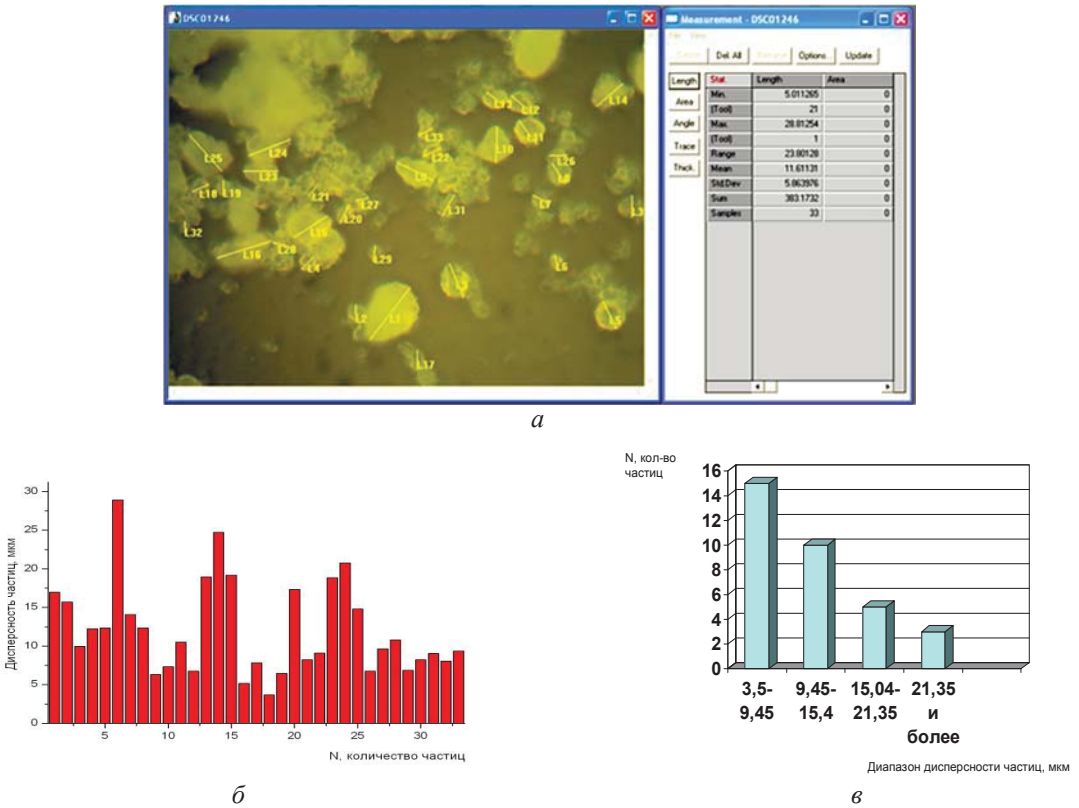
Динамика разрушения макрообъекта (агломерата) связана с условиями формирования двухосного (трехосного) механизма нагружения, а также дроблением вершин, острых кромок с формированием высокодисперсного порошка и более крупных частиц, которые в дальнейшем измельчаются по следующему механизму. По мере приближения инструмента к дну матрицы происходит усиление следующих явлений:

- влияние статической силы прекращается при достижении дисперсности порошка критического значения равного амплитуде колебания инструмента A , мкм;

- под воздействием акустического давления и интенсивности ультразвука, определяемыми по зависимостям [1], происходит формирование «звукового ветра», влияющего на скорость движения частиц среды.

За счет явления преломления и отражения ультразвуковой акустической волны происходит формирование турбулентного воздушного потока в динамически изменяющемся зазоре. Частица порошка, имеющие микроскопические и субмикроскопические размеры устремляются в направлении бокового зазора. Это явление создает безударный механизм диспергирования агломератов, а при достижении инструмента дна матрицы происходит её вращение за счет появления касательной составляющей колебательной скорости торца пуансона, формирующей вихревой турбулентный воздушный поток.

Результаты экспериментов представлены на рис. 1 и 2.

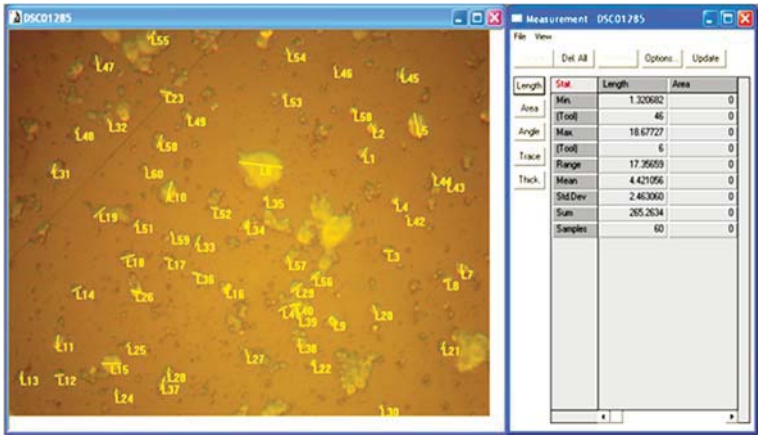


а *б* *в*

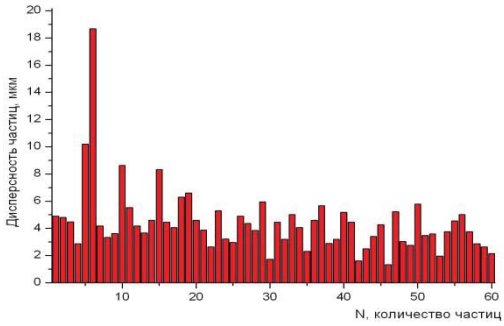
Рисунок 1 - Измерение размера частиц (а), распределение размера частиц порошке в пробе (б), гистограмма разброса частиц порошка в пробе (в). Частота ультразвука 22 кГц

Анализ частиц, извлеченных из матрицы экспериментальной установки, показал, что их размеры изменяются при обработке на частоте 22 кГц от 5 до 28 мкм. При этом дисперсия размеров составила порядка 36 мкм^2, наиболее часто (45,5%) встречающийся размер – порядка 6,5 мкм. При обработке на частоте 44 кГц формируются частицы с размерами от 1,3 до 18,6 мкм, дисперсия составляет 10 мкм^2, наиболее часто встречающийся (83,3%) размер – порядка 3,5 мкм. Таким образом, повышение частоты колебаний приводит к уменьшению основного размера частиц во фракции в 2 раза и уменьшению дисперсии (т.е. повышению однородности

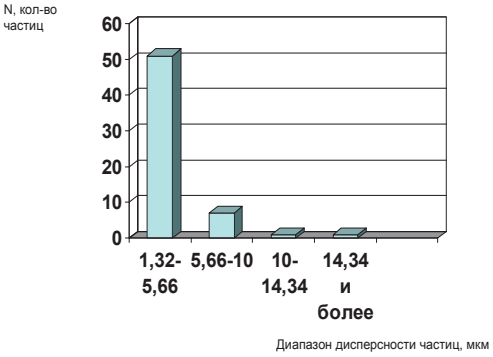
гранулометрического состава) в 3,6 раза. Разброс размеров частиц составляет 16,7%, что укладывается в отмеченный выше желательный показатель (до 25%). Размеры частиц, полученных в результате помола в мельнице, находятся в диапазоне 22 – 130 мкм, наиболее часто встречающийся (22,5%) размер частиц составляет 52 мкм, а дисперсия размеров 849 мкм^2, абсолютный разброс размеров относительно часто встречающегося достигает 78,5%. Частицы, полученные механическим помолом исходного макроагломерата, имеют неправильную форму с разницей размеров по осям до 2 и более раз.



а



б



в

Рисунок 2 - Измерение диаметра частиц (а), распределение частиц порошке в пробе (б), гистограмма разброса частиц порошка в пробе (в). Частота ультразвука 44 кГц

Частицы, полученные в ходе эксперимента, имеют меньшую величину, отличаются практически одинаковыми размерами и имеют правильную форму сфероидов. Это может объясняться механизмом их образования путем дробления в условиях высокочастотных колебаний, вызывающих хаотическое вращение вокруг произвольно возникающих осей, а также сглаживанием огранки в ходе движения по винтовой поверхности концентратора в установленном определенном зазоре с матрицей.

Выводы

Таким образом, предлагаемая схема получения неметаллических микропорошков ультразвуковым дроблением исходных макроагломератов на частоте 44 кГц обеспечивает существенное повышение однородности гранулометрического состава пробы по сравнению с механическим помолом, а также образование более симметричной формы частиц, что позволит улучшить качество формируемых прессованием, спеканием или напылением изделий за счет повышения однородности их физико-механических свойств.

Список литературы

1. *Бржозовский Б.М., Бекренев Н.В.* Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении. – Саратов.: СГТУ, 2009. 348 с.

JUSTIFICATION OF RECEIVING MONODISPERSE NONMETALLIC POWDERS ULTRASONIC CRUSHING OF AGGLOMERATES

Bekrenev N. V.,
Zlobina I. V.,
Petrovsky A. P.

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77 Politechnicheskaya street, Saratov, Russia, 410054
nikolaj.bekrenev@yandex.ru, irinka_7_@mail.ru

Abstract: The results of pilot studies of receiving nonmetallic micropowders ultrasonic crushing of initial macroagglomerates of a hydroxyapatite and glass furnace charge at frequencies of 22 and 44 kHz which showed essential increase of uniformity of particle size distribution of test in comparison with a mechanical grinding, and also formation of more symmetric form of particles that will allow to improve quality formed by pressing, agglomeration, 3-D press or a dusting of products due to increase of uniformity of their physicomechanical properties are given.

Keywords: ultrasound, particle size distribution, uniformity, crushing, technological scheme, sferoidization.

УДК: 621.91: 621.941

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОЛНИСТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ МЕТАЛЛОВ

Е.Б. БЕЛОВ[1], *аспирант,*
С.Л. ЛЕОНОВ [1], *доктор техн. наук, профессор,*
([1]АлтГТУ, г. Барнаул, Россия)

Белов Е.Б. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова,
e-mail: jeka-beliy@yandex.ru

Аннотация: Поставлена проблема обеспечения геометрических параметров качества обработанных поверхностей, которая приводит к необходимости прогнозировать наличие и величину колебательных явлений при механической обработке. Сформулированы цель и задачи исследования. Определены источники возникновения колебаний, ими являются координатная связь и нелинейность зависимости силы от скорости резания. Приведена математическая модель для прогнозирования установившихся автоколебаний. Уравнение движения вершины резца представляет собой систему двух нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Показан алгоритм, описывающий метод гармонической линеаризации, и позволяющий значительно сократить время расчетов. Для этого необходимо найти амплитуду колебаний, частоту и постоянную составляющую первой гармоники. Описано программное обеспечение, позволяющее получать параметры волнистости поверхности. Рассмотрен пример использования разработанной модели для операции получистовой токарной обработки вала из стали 40Х входящего в состав узла электропривода колеса БелАЗа. Приведены рекомендации по устранению автоколебаний в процессе резания вала и устранения брака по параметрам волнистости поверхности.

Ключевые слова: «точение, прогнозирование волнистости, установившиеся автоколебания, метод гармонической линеаризации, волнистость»

1. Введение

Повышение требований к служебному назначению изделий машиностроения приводит к соответствующему ужесточению требований к геометрическим параметрам качества изготовления поверхностей деталей – точности получаемых размеров, отклонений формы, взаимного расположения поверхностей, их волнистости и шероховатости [1]. Основное влияние на эти параметры оказывают вибрации в технологической системе, возникающие в процессе механической обработки [2].

Имеется достаточно подробные исследования причин возникновения колебаний – регенеративного эффекта, координатной связи, нелинейности системы [3]. Имеются и соответствующие модели для исследования этих причин [4]. Однако комплексный и всесторонний учет всех этих причин, а также их связь с вынужденными колебаниями, в современных исследованиях отсутствует. Связано это в основном с тем, что как вынужденные, так и автоколебания описываются системой дифференциальных уравнений, численное решение которой требует значительных затрат времени, связанных с необходимостью получения установившихся колебаний [5, 6].

С другой стороны имеются достаточно эффективные приближенные способы прогнозирования установившихся колебаний, одним из которых является метод гармонической линеаризации [7]. Использование этого метода позволяет значительно сократить время для прогнозирования автоколебаний и разработать инженерные методики и программное обеспечение для проектирования операций механической обработки с обеспечением заданных требований к волнистости обработанных поверхностей деталей [8].

Таким образом, исследования, направленные на решение проблемы прогнозирования волнистости обработанной поверхности при токарной обработке металлов на основе анализа автоколебательных явлений, являются актуальными.

Цель работы: прогнозирование волнистости обработанной поверхности при токарной обработке металлов на основе анализа автоколебательных явлений методом гармонической линеаризации.

Задачи исследования:

1. Разработать имитационную динамическую модель, для прогнозирования автоколебаний при точении с учетом параметров технологической системы.

2. Создать алгоритм расчета установившихся автоколебаний на основе применения метода гармонической линеаризации.

2. Теория

Имитационная динамическая модель расчёта параметров волнистости при точении металлов основывается на анализе процесса автоколебаний.

Основными источниками возникновения автоколебаний при точении являются координатная связь и нелинейность зависимость силы от скорости резания [9]. На рисунке 1 показана структурная схема нелинейной системы с учетом координатной связи.

На падающем участке зависимости силы от скорости резания (например, при $P_Z \approx P_0 - kV_0 + k\dot{z}$) упругая система, описываемая дифференциальным уравнением второго порядка, может стать неустойчивой, что для нелинейной системы соответствует возникновению автоколебаний.

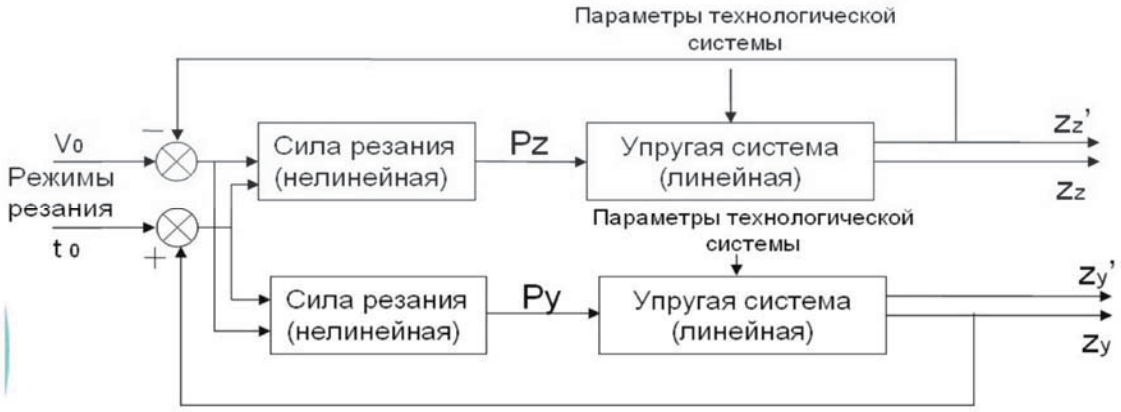


Рисунок 1. - Структурная схема нелинейной системы с учетом координатной связи

Координатная связь проявляется в том, что в общем случае под действием приложенной силы вершина резца стремится сместиться не только в направлении вектора силы, но и в ортогональном направлении. Это происходит из-за того, что жесткость инструментального узла различна по разным направлениям, т.е. существуют главные оси жесткости (оси V_1 и V_2), которые обычно не совпадают с координатными осями станка. На рисунке 2 приведена расчетная схема для математического описания колебательной системы.

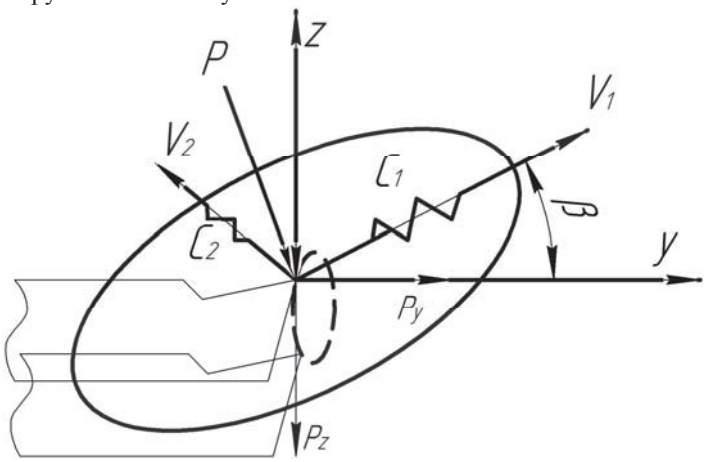


Рисунок 2. - Расчетная схема для математического описания координатной связи

Рассмотрим одномассовую систему, в которой происходят колебания только одного элемента - токарного резца - вдоль главных осей V_1 и V_2. Тогда уравнение движения представляет собой систему двух нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} m_1\ddot{V}_1 + G_1\dot{V}_1 + C_1V_1 = Py(V_\phi;t_\phi)\cdot\cos\beta - Pz(V_\phi;t_\phi)\cdot\sin\beta = P_1(V_\phi;t_\phi); \\ m_2\ddot{V}_2 + G_2\dot{V}_2 + C_2V_2 = -Py(V_\phi;t_\phi)\cdot\sin\beta - Pz(V_\phi;t_\phi)\cdot\cos\beta = P_2(V_\phi;t_\phi) \end{cases} \quad (1)$$

где: m_1; m_2, G_1, G_2, C_1, C_2 – соответственно, приведенные массы резца, коэффициенты демпфирования и жесткости по осям V_1; V_2;

$V_ф$ – фактическая скорость резания;

$t_ф$ – фактическая глубина резания.

Ранее проведенными исследованиями [9, 10] были получены формулы для расчета тангенциальной и нормальной составляющих силы резания (2).

$$Pz = Kt \cdot K_0 \cdot \left(\frac{a \cdot V \cdot k_1 + b \cdot k_2}{V^2 + f \cdot V \cdot k_5 + g \cdot k_6} + \frac{c \cdot k_3}{V} + d \cdot k_4 \right) \quad (2)$$

Аналитические выражения для расчета составляющих Pz и Py, получены аппроксимацией экспериментальных данных методом наименьших квадратов для стали 40Х.

Для расчета автоколебаний необходимо численными методами решать дифференциальное уравнение (1) при силе, полученной по формуле (2). Начальные условия для уравнения (1) можно выбирать произвольно, но для получения установившихся автоколебаний необходимо задаваться достаточно большим временем, что значительно увеличивает продолжительность расчета.

Дифференциальные уравнения второго порядка обладают фильтрующими свойствами [11] и даже при нелинейности силы резания колебания описываются законом, близким к моногармоническому по каждой из осей. Для проверки этой гипотезы мы численным методом решали систему (1) и разлагали решение в ряд Фурье. Опыт таких численных экспериментов показал, что первая гармоника колебаний обладает наибольшей амплитудой.

Учитывая это, разработан алгоритм получения первой гармоники установившихся колебаний, который позволяет исключить из расчетов переходной процесс и значительно сократить время решения. В основе этого алгоритма лежит метод гармонической линеаризации (МГЛ) [12].

Линейная часть системы обладает фильтрующими свойствами и фактически вырезает из спектра силы резания первые гармоники. (Приведено на примере одномассовой системы). Для решения необходимо найти параметры этой гармоники: амплитуду, частоту и постоянную составляющую.

Полагаем колебания по соответствующим осям моногармоническими с различными частотами:

$$\begin{aligned} V_1 &= A_1 \sin(\omega\tau) + V_{10} \\ V_1' &= A_1 \omega \cos(\omega\tau) \\ V_1'' &= -A_1 \omega^2 \sin(\omega\tau) \\ V_2 &= A_2 \sin(\omega\tau) + B_2 \cos(\omega\tau) + V_{20} \\ V_2' &= A_2 \omega \cos(\omega\tau) - B_2 \omega \sin(\omega\tau) \\ V_2'' &= -A_2 \omega^2 \sin(\omega\tau) - B_2 \omega^2 \cos(\omega\tau) \end{aligned} \quad (3)$$

где A_1, A_2, B_2, ω - соответственно, амплитуды и частота колебаний по осям V_1 и V_2;

V_{10}, V_{20} – средние значения упругих отжатий (постоянная составляющая).

Для этого силу резания P_z и P_y разлагаем в ряд Фурье, с сохранением только первой гармоники, считаем, что остальные ослабятся линейной частью (Рис. 1)

$$\begin{aligned} P_z(V_ф, t_ф) &= a_{10} + a_1 \sin\omega\tau + b_1 \cos\omega\tau \\ P_y(V_ф, t_ф) &= a_{20} + a_2 \sin\omega\tau + b_2 \cos\omega\tau \end{aligned} \quad (4)$$

Коэффициенты разложения в общем случае зависят от значений A и ω. Для решения необходимо найти параметры этой гармоники: амплитуды (A_1,A_2,B_2), частоту (ω) и постоянные составляющие (V_{10}, V_{20}).

Использование МГЛ позволяет рассчитать параметры первой гармоники автоколебаний и значительно сократить время расчетов. При необходимости получения более высоких гармоник или при расчете колебаний многомассовых систем алгоритм практически не меняется, только увеличивается количество искомых параметров. Волнистость обработанной поверхности определяется параметрами колебаний в технологической системе.

Высотные параметры волнистости определяются колебаниями в нормальном к обрабатываемой поверхности направлении. При этом параметр волнистости W_Z равен удвоенной амплитуде вибрации (Az) по оси z:

$$Wz = 2 \cdot Az \quad (5)$$

Шаговые параметры волнистости зависят от частоты колебаний ω и скорости резания $V_ф$. Колебания в тангенциальном направлении оказывают некоторое влияние на шаг волнистости, вызывая его неравномерность. На рисунке 3 приведен фрагмент расчетной круглограммы поверхности детали при наличии автоколебаний. В связи с колебаниями по двум координатам, волнистость имеет полигармонический характер.

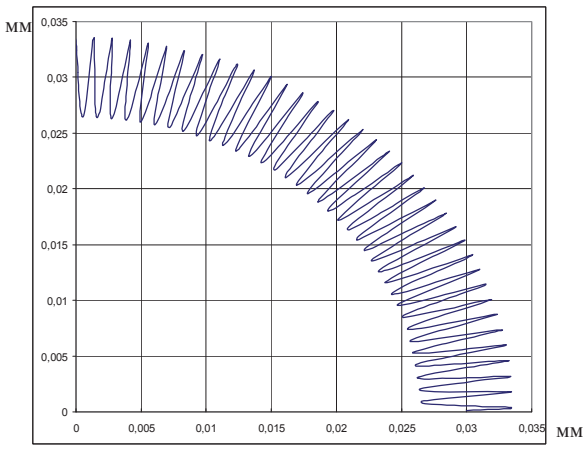


Рисунок 3 - Фрагмент круглограммы поверхности при ω = 12000 гц,
A_1 = 0,003 мм, A_2 = 0,0009 мм, B_2 = -0,07 мм

3. Результаты и обсуждение

На заводе «Механических прессов» города Барнаула при получистовой токарной обработки вала (сталь 40Х), на станке с ЧПУ японской фирмы MAZAK модели Integrex-e500 II 3000U возникали автоколебания. Вследствие чего, увеличивался износ режущего инструмента, образовывалась волнистость обрабатываемой поверхности (Рис.4).



Рисунок 4 - Поверхность вала со следами волнистости

В ходе решения данной задачи с применением разработанного программного обеспечения было предложено изменить режим резания, а именно снизить скорость резания с V=200м/мин используемых ранее, до V=150 м/мин, увеличив при этом подачу S=0,4 мм/об до S=0,55 мм/об. За счет корректировки режима резания снижены вибрации (автоколебания) и устранен брак по волнистости обработанной поверхности. При этом в 1,9 раза увеличена стойкость инструмента при соблюдении всех конструкторских параметров чертежа.

4. Выводы:

1. Разработанная имитационная модель для прогнозирования автоколебаний при точении учитывает нелинейность и координатную связь в технологической системе и позволяет с достаточной для практики точностью прогнозировать вибрации и связанную с ними волнистость обработанной поверхности.
2. Использование метода гармонической линеаризации для разработанной модели позволяет значительно сократить время расчета основных гармоник колебаний, что дает возможность использовать этот подход при проектировании технологических операций точения.
3. Математическая модель автоколебаний, дополненная методом гармонической линеаризации, дает возможность управлять вибрациями и позволяет на этапе проектирования технологических процессов прогнозировать волнистость обработанной поверхности при точении.

Список литературы

1. *Mason F.* Современные тенденции в измерении геометрических параметров деталей. // Tooling & Production. 2003. V. 69. Nr. 4. P. 24-26.

2. *Каширин, А. И.* Исследование вибраций при резании металлов / А. И. Каширин М.: Изд-во АН СССР, 1964. – 372 с.

3. *Свинин, В. М.* Исследование условий возбуждения и гашения регенеративных колебаний в процессе резания / В. М. Свинин // Обработка металлов. 2005. -№ 1. - С. 29-31.

4. *Лазарев, Г. С.* Автоколебания при резании металлов / Г. С. Лазарев — М.: Высшая школа, 1981. 243 с.

5. *Кудинов, В. А.* Автоколебания на низких и высоких частотах при резании / В. А. Кудинов // СТИН. 1997. - №2. - С. 16-21.

6. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ 2004611457. Расчет автоколебаний при резании металлов. / С. Л. Леонов, А. М. Марков, Е. В. Смирнов № 2004610835; заяв. 13.04.04; зарегистрировано 11.06.2004.

7. *Бублик, Б. Н.* Основы теории управления. / Б. Н. Бублик, Н. Ф. Кириченко Киев: Вища школа, 1985. - 328 с.

8. *Прилуцкий, В. А.* Технологические методы снижения волнистости поверхностей / В. А. Прилуцкий — М.: Машиностроение, 1982. 136 с.

9. *Леонов, С. Л.* Основы создания имитационных технологий прецизионного формообразования / С. Л. Леонов, А. Т. Зиновьев — Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. 198 с.

10. *Белов, Е.Б.* Прогнозирование автоколебаний при точении/ С.Л. Леонов доктор техн. наук, В. Д. Гончаров канд. техн. наук, Е.Б. Белов аспирант, А.Б. Белов аспирант./ Украина, г. Харьков, издательство НТУ, 2011г., С. 45-48

11. *Илюхин, С. Ю.* Математические основы моделирования процесса формообразования поверхностей режущим инструментом / С. Ю. Илюхин // СТИН. 2006. - №12. - С. 23-25.

12. *Бесекерский, В. А.* Теория систем автоматического регулирования. / В. А. Бесекерский, Е. В. Попов М.: Наука, 1982. - 768 с.

CALCULATION OF STEADY SELF-OSCILLATIONS FOR FORECASTING OF MACHINED SURFACE WAVINESS AT TURNING OF METAL

Belov E. B. [1], Ph.D. student, e-mail: jeka-beliy@yandex.ru
Leonov S. L. [1], D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: sergey_and_nady@mail.ru

[1] Polzunov Altai State Technical University, 46 Prospect Lenina, Barnaul, 656038, Russian Federation

Abstract: The paper states a problem of providing quality of geometrical characteristics of the machined surfaces, which makes it necessary to forecast occurrence and amount of oscillations appearing in the course of mechanical treatment. Purposes and objectives of research are formulated. Sources of oscillation onset are defined: these are coordinate connections and nonlinear dependence of cutting force on cutting velocity. Mathematical model of steady-state self-oscillations forecasting is investigated. Equation of cutter tip motion is a system of two second-order nonlinear differential equations. The paper shows an algorithm describing a harmonic linearization method, which allows for a significant reduction of calculation time. In order to get that done it is necessary to determine amplitude of oscillations, first harmonic frequency and steady component. Software, which allows obtaining data on surface waviness parameters, is described. The paper studies an example of the use of the developed model by semifinished lathe machining of the shaft made of steel 40H, which is a part of BelAZ wheel electric actuator unit. Recommendations are given for elimination of self-oscillations in the process of shaft cutting and for correction of surface waviness defects.

Keywords: «turning, forecasting waviness, steady of self-oscillations, harmonic linearization method, waviness»

УДК: 621.91: 621.941

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННЫХ ОТВЕРСТИЙ НА МНОГОЦЕЛЕВЫХ ТОКАРНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ

А. Б. БЕЛОВ[1], аспирант,
С. Л. ЛЕОНОВ[1], доктор техн. наук, профессор,
([1]АлтГТУ, г. Барнаул, Россия)

Белов А.Б. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет,
e-mail: alexbelyj1209@yandex.ru

Аннотация: В результате выполнения работы решена актуальная научно-практическая задача обеспечения заданных геометрических параметров качества при фрезеровании отверстий. Сформулированы цель и задачи исследования. Определены источники возникновения волнистости и других геометрических параметров качества поверхности при обработке на токарно-фрезерных обрабатывающих центрах. При этом волнистость определяется как процессом геометрического копирования, так и динамическими явлениями при обработке. Приведена математическая модель формирования поверхности отверстий, на основе геометрического копирования, позволяющая рассчитать составляющую волнистости обработанной поверхности и создающая базу для имитационной модели. Разработана имитационная модель учитывающая динамические явления при фрезеровании, которая дает возможность прогнозировать профиль обработанной поверхности, а по нему – определять все необходимые геометрические параметры качества. Построен алгоритм проектирования операции фрезерования, позволяющий произвести проверку обеспечения требований к геометрическим параметрам качества поверхности еще на этапе разработки технологического процесса. Рассмотрен пример использования разработанной модели для операции фрезерования отверстий детали на обрабатывающем центре фирмы DMG модели DMU-50 (на заводе ОАО АПЗ «Ротор» города Барнаула).

Ключевые слова: «фрезерование, прогнозирование качества поверхности, имитационное моделирование, математическое моделирование, волнистость»

1. Введение

Развитие машиностроительной промышленности в современных условиях характеризуется усилением конкуренции на мировых рынках. Основной задачей предприятий в таких условиях становится выпуск высококачественной продукции при жесткой экономии материальных и временных ресурсов.

Усложнение конструкций деталей, повышение требований к точности и качеству поверхности предполагает увеличение объема операций лезвийной обработки, среди которых операции по обработке отверстий, в том числе и находящихся не на основной оси детали, занимают особо заметное место [1,2]. Эти отверстия обычно используются для базирования и поэтому к их поверхностям предъявляются высокие требования по параметрам точности и волнистости. Операции обработки отверстий достаточно часто выполняются на токарно-фрезерных обрабатывающих центрах с использованием в качестве инструмента концевых фрез и имеют целый ряд особенностей по сравнению с обработкой других поверхностей. Обработка концевыми фрезами во многих случаях наиболее экономичный способ получения таких отверстий.

Однако, фрезерование отверстий сопровождается появлением целого ряда погрешностей, связанных как с кинематикой, так и с динамикой процесса обработки, вопросы прогнозирования которых на этапе проектирования операций в настоящее время недостаточно изучены. В этом плане математическое моделирование процессов фрезерования отверстий на токарно-фрезерных обрабатывающих центрах является мощным инструментом для автоматизации проектирования операций механической обработки [3,4].

Таким образом, исследования, направленные на решение проблемы прогнозирования точности и волнистости обработанной поверхности при фрезеровании отверстий на основе математического моделирования являются актуальными.

Цель работы: обеспечение заданных геометрических параметров качества фрезерования отверстий на многоцелевых токарно-фрезерных обрабатывающих центрах.

Задачи исследования:

1. Разработать имитационную модель динамических явлений при фрезеровании отверстий, на основе математической модели формирования поверхности отверстия;

2. Разработать алгоритм и методику проектирования операции фрезерования на многоцелевых токарно-фрезерных обрабатывающих центрах;

2. Теория

Снижение себестоимости и повышение производительности обработки относится к основным задачам технологии машиностроения. Решение этой задачи в производственных условиях осложняется необходимостью обеспечения различных технологических требований к точности, и волнистости обработанной поверхности, а также ограничений, накладываемых характеристиками оборудования, что требует разработки соответствующих математических моделей [5].

Волнистость обработанной поверхности определяется как процессом геометрического копирования профиля зубьев фрезы, так и динамическими явлениями при резании, которые в свою очередь зависят от режима резания и геометрии инструмента. На рисунке 1 показана структурная модель операции фрезерования.

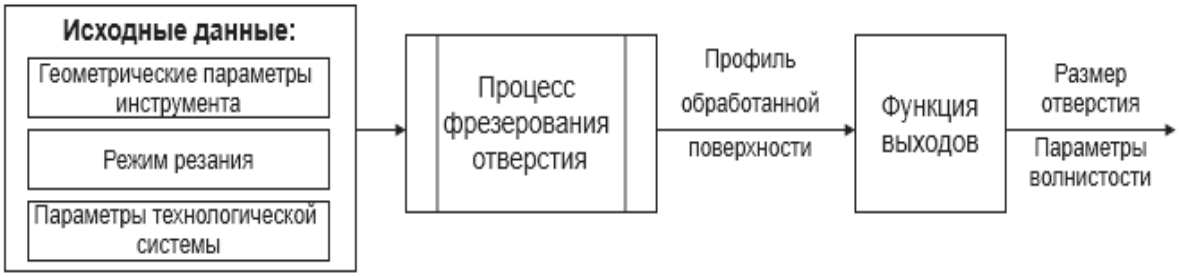


Рисунок. 1. Структурная модель операции фрезерования

Если пренебречь крутильными колебаниями фрезы, ее вибрации, вызываемые переменной силой резания, описываются дифференциальным уравнением [6]:

$$m\Delta\ddot{r} + G\Delta\dot{r} + C\Delta r = P = k_P a\,,$$

где m, G и C – соответственно, приведенная масса, демпфирование и жесткость;

Δr – мгновенные значения упругих отжатий фрезы по нормали к обрабатываемой поверхности;

P – нормальная составляющая силы резания;

a – толщина срезаемого слоя;

k_P – эмпирический коэффициент, который определяется характеристиками обрабатываемого и инструментального материала и параметрами режима резания.

Для решения дифференциального уравнения предлагается приближенные подход, основанный на использовании частотных характеристик.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) системы преобразует колебания силы резания в изменение упругих отжатий. Для упругой системы АЧХ и ФЧХ определяются выражениями:

$$A(\omega) == \frac{k}{\sqrt{(1-T^2\omega^2)^2 + (2eT\omega)^2}};$$

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} -arctg\dfrac{2et\omega}{1-T^2\omega^2}, \omega \le \dfrac{1}{T} \\ -\pi - arctg\dfrac{2et\omega}{1-T^2\omega^2}, \omega > \dfrac{1}{T} \end{cases}$$

Радиальная составляющая силы резания разлагается в ряд Фурье:

$$P_P = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{N}\left(a_i \cos(i\omega_1\tau) + b_i \sin(i\omega_1\tau)\right)$$

В зависимости от углового положения и глубины резания для каждого зуба определяются составляющие силы резания. Радиальные составляющие P_p суммируются и используются в дальнейшем для расчета колебаний. Рассчитывается период изменения силы резания (первый период использовать нельзя из-за возможных искажений от врезания). Расчет упругих отжатий при фрезеровании и отклонений формы производится с использованием частотных характеристик колебательного звена, определяемого параметрами M, G и C фрезы.

Передаточная функция колебательной системы:

$$W(s) = \frac{1}{Ms^2 + Gs + C} = \frac{k}{T^2 s^2 + 2eTs + 1};$$

$$k = \frac{1}{C};\quad T = \sqrt{\frac{M}{C}};\quad e = \frac{G}{2TC}$$

С учетом частотных характеристик, упругие отжатия, определяющие профилограмму отверстия, рассчитываются по формуле:

$$\Delta R = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{N} A(i\omega_1)\left(a_i \cos(i\omega_1\tau + \varphi(i\omega_1)) + b_i \sin(i\omega_1\tau + \varphi(i\omega_1))\right)$$

На рисунке 2а приведен пример профиля обработанной поверхности при R=25мм, r=16мм, $R_{заг}$=20мм, фреза с тремя зубьями. ω_1=5рад/с, ω_2=50рад/с. Параметры технологической системы: m=0,5кг, G=0,05нс/мм, C=2000н/мм. Коэффициент для расчета силы резания k_P=200н/мм. Из численного моделирования видно, что профиль обработанного отверстия имеет сложный вид и искажен колебаниями в технологической системе.

Изменение параметров технологической системы также оказывает значительное влияние на профиль обработанного отверстия. Так, например, при небольшом снижении жесткости технологической системы (например, до C=1700 н/мм) колебания и профиль обработанного отверстия остаются практически неизменными. Однако одновременно с уменьшением жесткости обычно увеличивается приведенная масса m, что в сумме может приводить к значительным искажениям формы отверстия. На рисунке 2б показан профиль поверхности при C=1700н/мм и m=0,6кг.

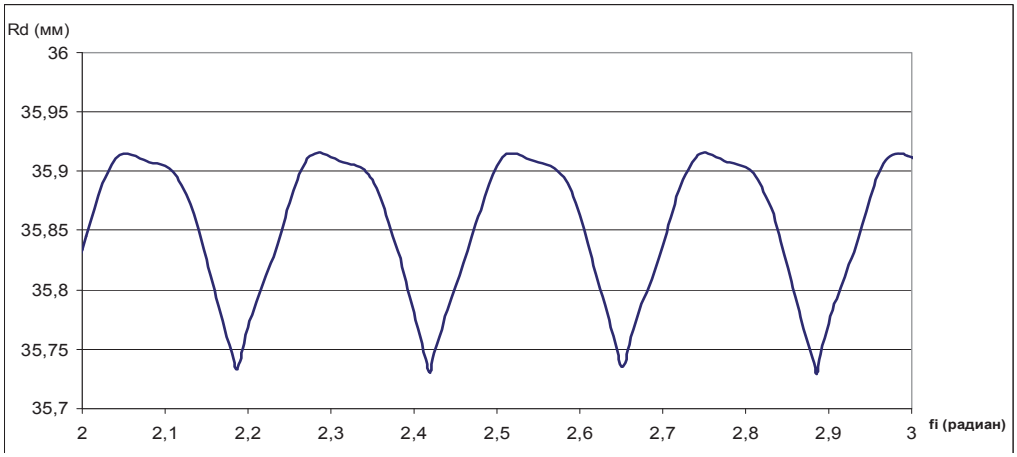


Рисунок 2. а)

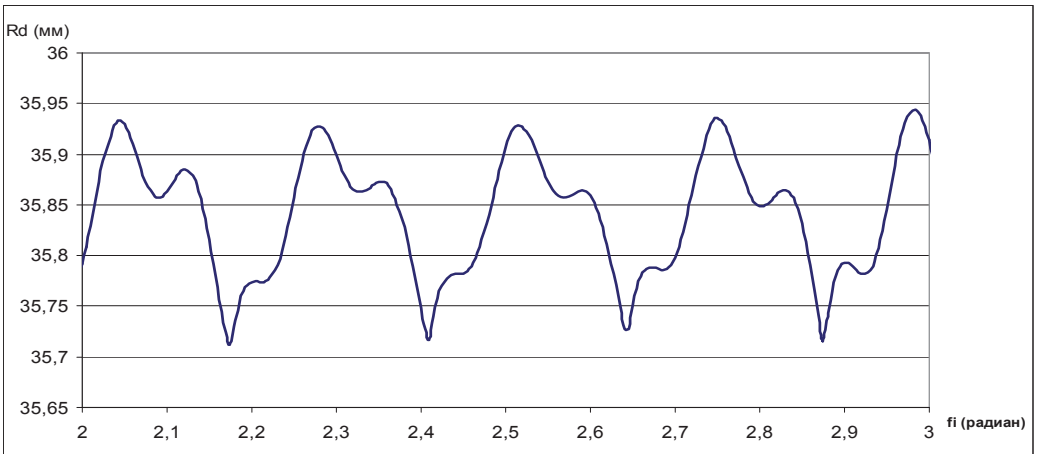


Рисунок 2. б)

На основании разработанных моделей создан алгоритм проектирования операции фрезерования на токарно-фрезерных обрабатывающих центрах.

3. Результаты и обсуждение

В качестве примера рассмотрим операцию фрезерования отверстий детали на обрабатывающем центре фирмы DMG модели DMU-50 (на заводе ОАО АПЗ «Ротор» города Барнаула). На рисунке 3 приведена фотография технологической наладки на данную операцию.

В процессе обработки детали возникают колебания, вследствие чего, увеличивается износ режущего инструмента (уменьшается его стойкость), образуется волнистость обрабатываемой поверхности. Отверстия детали, на которых образуется волнистость, используются для базирования приспособлений при дальнейшей обработке. Материал детали – сталь 12Х18Н10Т.

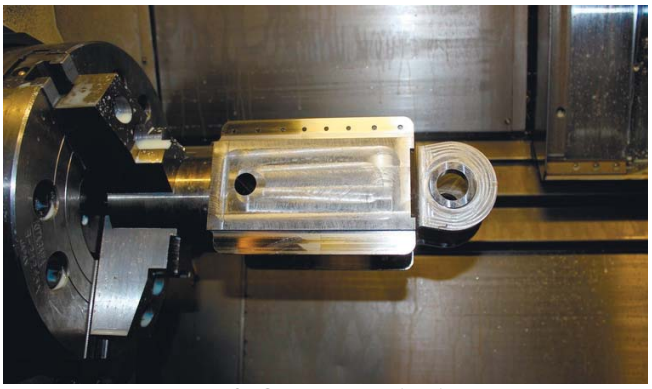


Рисунок 3. Операция обработки отверстий

Расчеты по разработанным моделям позволяют предложить конкретные технологические рекомендации по снижению волнистости обработанной поверхности отверстия.

На рисунке 4 приведена фотография поверхности детали, на которой явно видны следы вибраций при чистовой обработке.

В ходе решения данной задачи с применением разработанного программного обеспечения было предложено изменить режим резания, а именно увеличить скорость резания с V=35 м/мин используемых ранее, до V=60 м/мин, при этом сохранив подачу S=0,15 мм/об и глубину резания t=12мм. За счет внедрения нового инструмента и корректировки режима резания снижены вибрации и устранен брак по волнистости обработанной поверхности.

В целом разработанные модели позволяют прогнозировать волнистость обработанной поверхности при фрезеровании отверстий на станках с ЧПУ на этапе проектирования технологических процессов. Это дает возможность гарантировать выполнение технических требований по геометрическим параметрам качества обработанной поверхности.



Рисунок 4. Поверхность детали со следами волнистости

4. Выводы:

1. Разработана имитационная модель учитывающая динамические явления при фрезеровании, дающая возможность прогнозировать профиль обработанной поверхности, а по нему – определять все необходимые геометрические параметры качества.

2. Построен алгоритм проектирования операции фрезерования, позволяющий произвести проверку обеспечения требований к геометрическим параметрам качества поверхности еще на этапе разработки технологического процесса.

Список литературы:

1. Кудинов, В.А. Динамика станков / В. А. Кудинов - М.: Машиностроение, 1967. – 360с.

2. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М. : Машиностроение, 1975. – 224 с.

3. Прилуцкий, В. А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей / В. А. Прилуцкий – М.: Машиностроение, 1978. - 136 с.

4. Леонов С.Л. Основы создания имитационных технологий прецизионного формообразования/ Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006.-198 с.

5. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.

6. Леонов С.Л., Белов А.Б. Имитационное моделирование волнистости при фрезеровании отверстий/ «Вестник Алтайской науки»: Изд-во АлтГТУ.

FORECASTING OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF QUALITY OF THE PROCESSED OPENINGS ON THE MULTI-PURPOSE TURNING AND MILLING PROCESSING CENTERS

Belov A. B. [1], Ph.D. student, e-mail: alexbelyj1209@yandex.ru
Leonov S. L.[1], D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: sergey_and_nady@mail.ru

[1] Polzunov Altai State Technical University, 46 Prospect Lenina, Barnaul, 656038, Russian Federation

Abstract: As a result of performance of work the actual scientific and practical problem of ensuring the set geometrical parameters of quality when milling openings is solved. The purpose and research problems are formulated. Sources of emergence of a waviness and other geometrical parameters of quality of a surface when processing on the turning and milling processing centers are defined. Thus the waviness is defined both process of geometrical copying, and the dynamic phenomena when processing. The mathematical model of formation of a surface of openings, on the basis of geometrical copying, allowing to calculate a component of a waviness of the processed surface and creating base for imitating model is given. The imitating model considering the dynamic phenomena when milling, giving the chance to predict a profile of the processed surface is developed, and – to determine all necessary geometrical parameters of quality by it. The algorithm of design of operation of milling allowing to make check of providing requirements to geometrical parameters of quality of a surface at a development stage of technological process is constructed. An example of use of the developed model for operation of milling of openings of a detail on the processing center of DMG firm of the DMU-50 model is reviewed (at JSC APZ Rotor plant of the city of Barnaul).

Keywords: "milling, forecasting of quality of a surface, imitating modeling, mathematical modeling, waviness "

УДК 620.22:539.374:669.715

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОВОДКИ ШАРИКОВ

В.В. БОЛКУНОВ,
Н.В. ГРИГОРЬЕВА,
О.П.РЕШЕТНИКОВА
(СГТУ, г. Саратов, Россия)

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.
410054, г. Саратов, ул. Политехническая w
Tusichka180619902@mail.ru

Аннотация: В статье рассмотрен способ двухдисковой доводки шариков, основанный на принципе сообщения им в зоне обработки движения, через опорные точки инструментального диска, непрерывно изменяющие свои угловые положения. Так же предложено устройство для реализации данного способа.

Ключевые слова: Доводка, шарик, угол контакта, подшипник, гидросуппорт.

Технический уровень и качество выпускаемых машин, механизмов и приборов в значительной степени определяется качественными показателями подшипников качения. Увеличение точности и быстроходности машин ставит задачи повышения технических требований к изготовлению деталей подшипников и, в частности, к изготовлению шариков, от степени точности которых зависят надежность, долговечность, виброакустические и другие характеристики шарикоподшипников. В связи с этим дальнейшее совершенствование методов обработки шариков, а также изыскание и внедрение новых более прогрессивных методов представляет весьма актуальную задачу в современном производстве.

Разработка более эффективных способов финишной обработки шариков высших степеней точности, обеспечивающих достижение эксплуатационных характеристик подшипников на уровне лучших мировых образцов, в настоящее время особенно актуально. Для финишной обработки шариков на подшипниковых заводах используют шародоводочные станки, на которых инструментальные диски имеют концентричные направляющие канавки. Даже при многократном обращении шарика по такой кольцевой канавке образуются следы от точек контакта с инструментом в виде окружностей, расположенных в плоскостях, перпендикулярных оси мгновенного вращения их, то есть значительная часть поверхности шарика не подвергается обработке от движения качения.

Для устранения этого недостатка предложен способ двухдисковой доводки шариков, основанный на принципе сообщения им и зоне обработки движения через опорные точки инструментального диска непрерывно изменяющие свои угловые положения [l]. При этом способе не устраняется нетехнологичность процесса обработки шариков, так как неэффективное контактирование шарика ограничивает достижение более высокой его точности. Предложенным инструментальным дискам , кроме того, свойственна потеря первоначального кинематического эффекта из-за износа волнообразного выступа канавки .

На кафедре "Технология машиностроения" СГТУ разработан способ и предложено устройство его реализации, воспроизводящее обработку шариков с переменными углами контактирования. Криволинейный паз в нем выполнен в пределах ширины направляющей канавки так, что положение продольной оси его имеет периодическое изменение, приближаясь то к одному то к другому краю паза, которые предназначены для опоры под шарик [2].

На рис 1 показана схема способа. На инструментальном диске в направляющей канавке 1, профилированной в поперечном ее сечении по дуге окружности радиуса. Равного радиусу обрабатываемого шарика, протачивается продольный паз 2 по направлению кривой 3 синусоидального вида, наложенной на окружность. Исходными конструктивными параметрами канавки, определяющими кинематику шарика, являются число волн на окружности диска и ширина синусоидального паза канавки, Данное способ обеспечивает в процессе качения шарика непрерывное изменение геометрии радиальных сечений направляющей канавки, на которые в каждое мгновение опирается шарик. При этом изменяется относительный уровень положений опорных точек А и В в канавке для шарика, а следовательно, и положений его оси качения, ограниченной точками А и Б, и положений полюса Р на оси вращения 0 - 0 диска. В результате шарик получает требуемое дополнительное вращение вокруг своей вертикальной оси.

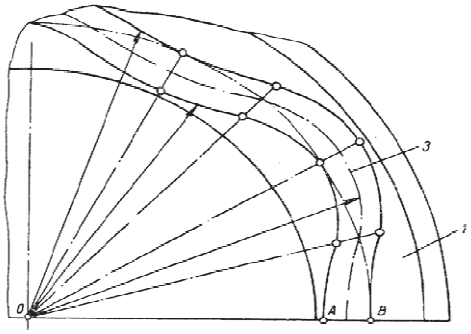


Рисунок 1 - Схема способа доводки шариков инструментальным диском с синусоидальными пазами.

Однако этим достигается лишь осциллирующее качение шарика по направляющей, так как мгновенно ось абсолютного его вращения совершает ограниченное колебательное движение, ввиду чего проявляется полюсность изделия, т.е. недоработка диаметрально противоположных. участков поверхностей шариков за каждый проход ими зоны обработки.

Повышение качества шариков путем равномерного однонаправленного вращения их при обработке достигается тем, что в предлагаемом инструментальном диске для доводки шариков с расположенной на его торце концентричной тороидальной канавкой, на поверхности которой выполнены продольные криволинейные пазы, последние расположены по винтовым линиям вокруг круговой оси тороидальной канавки[3]. На рис.2 показана схема способа и устройство для его реализации в плане, а на рис.2 - то же по сечению инструментального диска. Инструментальный диск имеет направляющую концентричную тороидальную канавку 1, профилированную в поперечном ее сечении по дуге окружности радиусом, равным радиусу обрабатываемого шарика 2. В пределах ширины канавки 1 расположены проточенные пазы 3 по форме многозаходной резьбы.

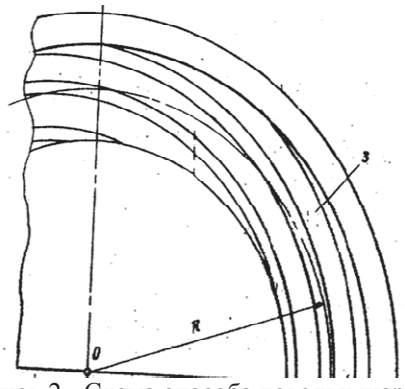


Рисунок 2 - Схема способа доводки шариков инструментальным диском, на поверхности которого выполнены криволинейные пазы 3.

Пазы 3 размещены по винтовым линиям вокруг круговой оси концентричной тороидальной канавки 1. Данный инструментальной диск при его работе обеспечивает в процессе качения шарика 2 непрерывное, однонаправленное изменение геометрии радиальных сечений направляющей канавки 1 и винтовых пазов 3, на которые в каждое мгновение опирается шарик 2. При этом изменяется относительный уровень парных положений точек А, В и Д в канавке 1 для шарика 2,,а, следовательно, и положения его оси качения, ограниченной точкой положения полюса Р на оси вращения 0-0 диска и точками А и В или В и Д. В результате шарик 2 получает дополнительное однонаправленное круговинтовое движение в зоне обработки.

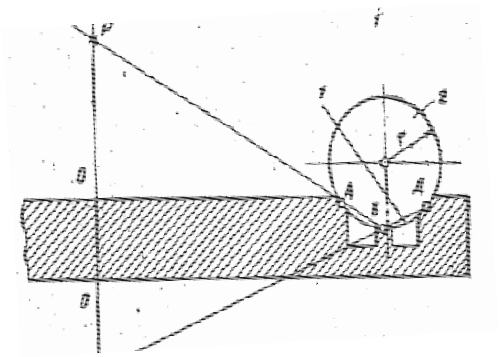


Рисунок 3 - Сечение инструментального диска по новому способу.

Предлагаемый инструментальный диск позволяет повысить производительность и точность доводки шариков путем закономерного исключения недоработки полюсов шариков, (диаметрально противоположных участков поверхности шарика) за каждый проход ими зоны обработки посредством придания однонаправленного вращательного движения мгновенным осям их вращения в плоскостях радиальных сечений диска.

Получение пазов по винтовым линиям вокруг круговой оси концентричных тороидальных канавок инструментального диска потребовало разработки специального устройства к лобовому токарному станку [4], в котором резцовый блок закреплен непосредственно на корпусе гидроцилиндра, а шток -со станиной станка. Это позволяет повысить жесткости устройства и разгрузить цепи управления от усилий резания.

Устройство работает следующим образом. При вращении шпинделя станка с обрабатываемой инструментальным диском вращается шлицевой вал , кинематически связанный со шпинделем станка. От вала при помощи конической шестерни и конического колеса получает вращение приводной вал кулачкового или, как частный случай его выполнения, эксцентрикового механизма. Последний посредством толкателя двуплечего рычага воздействует по уста-

новленному закону на щуп золотника гидроцилиндра. Золотник, гидроцилиндр и инструмент между собой жестко связаны и являются единым подвижным звеном гидросуппорта. Неподвижным звеном гидросуппорта, связанным со станиной станка, является поршень со штоком, относительно которого инструмент совершает возвратно-поступательное движение. Это движение управляется золотником , требуемое движение которому задает кулачковое устройство. Введение гидроцилиндра между резцом и толкателем кулачкового механизма разгружает элементы конструкции кулачкового механизма т. е. управляющую цепь, от усилия давления на резец в процессе резания и тем самым повышается жесткость системы, точность обработки и производительность процесса изготовления инструментальных дисков для доводки шариков.

Применение новой технологии позволяет не только повысить производительность процесса доводки, но и получать шарики высших степеней точности, потребность в которых непрерывно возрастает.

Список литературы

1. Патент ГДР B73717,кл. 67a, 12, 1970

2. А.с. 347178 СССР МКИ[3] B 24 B ll/02, Инструментальный диск для шлифования и доводки шариков / С.Г.Редько, К.М.Сивяков (СССР). - №1199030; опубл.10.08.1972,Бюл.№ 24.-2с: ил.

3. А.с.622651 МПК Инструментальный диск для доводки шариков / Сивяков К.М., Сивякова Э.П., Болкунов В.В., Кукушкин В.И. (СССР). - № 2103204; заявл.06.01.1975;опубл.05.09.1978

4. А.с. №724276 СССР, МПК B23B5/44. Устройство для обработки деталей некруглой формы / К. М. Сивяков, В. В. Болкунов, В. И. Кукушкин (СССР).-№2391677/25-08; опубл. 30.03.80, Бюл.№12

INCREASE OF EFFICIENCY OF OPERATIONAL DEVELOPMENT OF BALLS

Bolkunov V.V.,
Grigorieva N.V.,
Reshetnikova O.P.
The Saratov state technical university of Gagarin Yu. A., 410054, Saratov, Politekhnicheskaya 77, Tusichka180619902@mail.ru

Abstract: The article considers the way double disc polishing balls is based on the principle messages to them in the treatment area movement, through the reference point of the tool disk, continuously changes its angular position. Also proposed a device for implementing this method.

Keywords: Lapping, ball, contact angle, bearing, hydrosport.

УДК 621.7

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ СОПРЯГАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА КАЧЕСТВО СБОРКИ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

А. А. ДЕМИН, инженер
И. А. ТИТОВ канд. техн. наук, доцент
(БТИ (филиал) АлтГТУ, г. Бийск)

Демин А. А. – 659307, г. Бийск, ул. Трофимова 27,
Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ,
e-mail: presskov@mail.ru

Аннотация: Одним из перспективных направлений повышения качества сборки прессовых соединений является пластическое деформирование одной из собираемых деталей или промежуточного элемента, поскольку пластические деформации могут компенсировать погрешности формы и размеров соединяемых деталей. Сборка пластическим деформированием позволяет снизить себестоимость деталей соединения за счет частичного исключения из технологического процесса их изготовления трудоемких финишных операций. В научно-технической литературе отсутствуют исследования посвященные точности сборки прессовых соединений, содержащих пластически деформируемый элемент с переменным распределением механических свойств. В данных исследованиях были получены аналитические выражения, определяющие точность сборки в зависимости от разностенности промежуточной деформируемой втулки и от точности изготовления охватываемой и охватывающей деталей. Для проверки адекватности полученных выражений были проведены экспериментальные исследования и моделирование процесса сборки соединений методом конечных элементов. Предлагаемый способ сборки позволяет обеспечить высокую точность базирования узлов деталей в широком диапазоне допусков на изготовление соединяемых деталей прессовых соединений.

Ключевые слова: сборка, прессовые соединения, прочность, точность, зазор.

Одним из перспективных направлений повышения качества сборки прессовых соединений является пластическое деформирование одной из собираемых деталей или промежуточной детали – деформируемой втулки [1], поскольку пластические деформации в некоторых случаях могут компенсировать погрешности формы и размеров соединяемых деталей. Сборка пластическим деформированием позволяет снизить себестоимость деталей соединения за счет частичного исключения из технологического процесса их изготовления трудоемких финишных операций. Вместе с тем, после сборки соединение должно обеспечивать точное базирование деталей особенно в случае выпуска высокотехнологичной продукции.

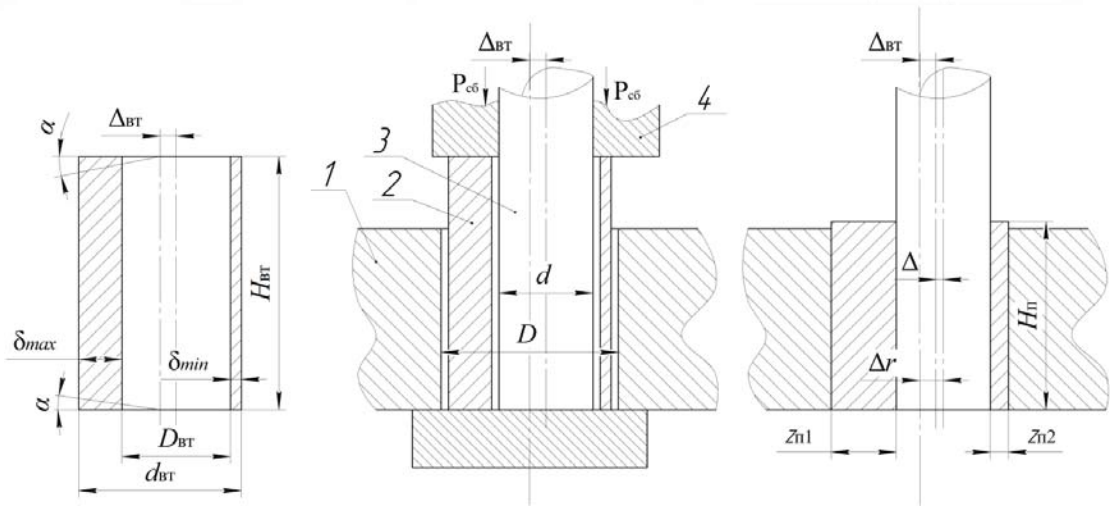
С целью удешевления производства и снижения трудоемкости необходимо определить максимальные допуски на изготовление деталей, в пределах которых соединение будет обеспечивать требуемую точность базирования узла.

При сборке трехэлементных прессовых соединений [2] возникает смещение оси охватываемой детали (Рис. 1), которое обусловлено разностенностью промежуточной деформируемой втулки, т.е. при изготовлении втулки ее внутренний диаметр будет смещен относительно наружного на некоторую величину $\Delta_{вт}$. Смещение охватываемой детали Δr после сборки соединения можно определить как сумму смещения оси втулки $\Delta_{вт}$ и смещения Δ, возникающего во время осадки втулки при компенсации монтажного зазора (Рис. 1*в*).

Величину смещения оси, которую получит охватываемая деталь после сборки соединения, определяли в зависимости от разностенности втулки (Рис. 2) и от точности изготовления охватываемой и охватывающей деталей (Рис. 3). Исходя из теории ОМД и в предположении, что материал втулки является пластичным в пределах компенсации заданных монтажных зазоров было получено аналитическое выражение величины отклонения оси вала в зависимости от разностенности втулки:

$$\Delta r = \frac{(D-d)\cdot\delta_{max}}{\delta_{min}+\delta_{max}} - \frac{D-d}{2} \qquad ,(1)$$

где δ_{max} – максимальная толщина стенки втулки;
δ_{min} – минимальная толщина стенки втулки.



а) б) в)

1 – охватывающая деталь (корпус); 2 – промежуточная деформируемая втулка; 3 – охватываемая деталь (вал); 4 – сборочный инструмент (пуансон).

Рисунок 1 – Схема смещения оси охватываемой детали при сборке трехэлементных прессовых соединений

С целью компенсации влияния разностенности втулки на точность сборки было предложено удалять часть ее материала с торцевой поверхности утолщенной части, срезая его под углом α (Рис. 1*а*). При этом из условия равенства объемов и с учетом выражения (1) можно определить значение угла α обеспечивающие компенсацию погрешности изготовления втулки:

$$\alpha = \mathrm{atg}\left[\frac{H_{вт}}{2\cdot x_c\cdot D_{вт}} - \frac{2\cdot H_{вт}\cdot(\pi\cdot 0,5\cdot D_{вт}^{\,2} - \pi\cdot d_{вт}^{\,2} + \mathrm{a\,cos}(\Delta_{вт}/0,5d_{вт})\cdot d_{вт}^{\,2} - 0,25\cdot\Delta_{вт}\cdot\sqrt{(0,5d_{вт})^2 - \Delta_{вт}^{\,2}})}{(\pi\cdot 0,5\cdot D_{вт}^{\,2} - \mathrm{a\,cos}(\Delta_{вт}/0,5d_{вт})\cdot d_{вт}^{\,2} - \Delta_{вт}\cdot\sqrt{(0,5d_{вт})^2 - \Delta_{вт}^{\,2}})\cdot x_c\cdot D_{вт}}\right] \quad (2)$$

где x_c – расстояние от оси до центра тяжести сечения утолщенной части втулки.

Однако, как показали исследования, предлагаемая зависимость имеет расхождения с экспериментальными данными. Для выявления причин расхождения был проведен анализ течения материала во время осадки втулки с использованием моделирования процесса сборки соединений методом конечных элементов. Поскольку результаты проведенного моделирования и эксперимента (Рис. 2, 3) совпали их можно использовать для отражения реальной картины деформирования материала втулки во время ее осадки.

Расхождение результатов полученных с помощью численного эксперимента и выражений (1) и (2) можно объяснить тем, что в процессе осадки втулки на характер перераспределения ее материала (Рис. 4) в зазоре соединения существенное влияние оказывает трение. Это приводит к нарушению предположения о равенстве объемов материала левой и правой частей втулки после сборки соединения. Поэтому реальное смещение Δr оси охватываемой детали имеет несколько меньшее значение.

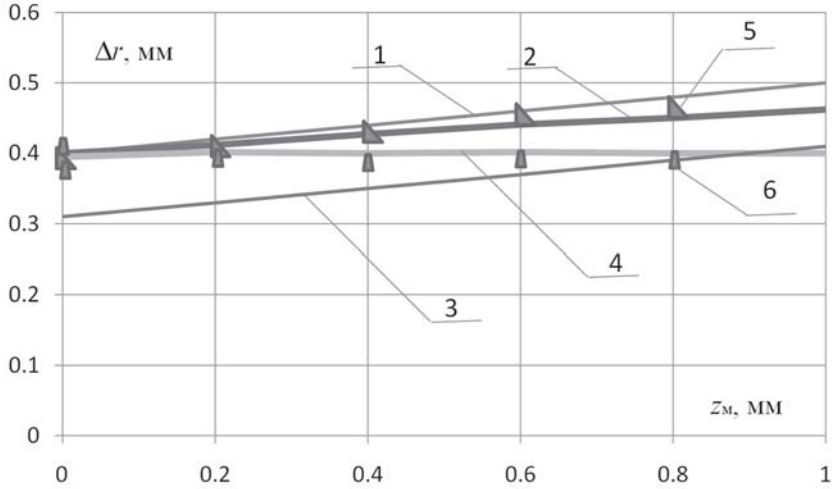
Расчеты по зависимости (2) показывают, что при относительной разностенности втулки 0,04 необходимый угол обрезки α составляет 15°. При таком значительном удалении объема материала, в процессе осадки втулки происходит разрушение ее оставшейся выступающей части. Экспериментальные исследования показали, что максимальный возможный угол обрезки составляет 5-8°, что позволяет компенсировать большую часть смешения оси охватываемой детали после сборки в пределах 11-12 квалитета точности изготовления втулки. Поскольку относительное отклонение от соосности в этом случае составляет 0,02-0,03 согласно [3].

Следует отметить, что с увеличением монтажного зазора точность сборки снижается, причем тем значительнее, чем больше исходное отклонение от соосности втулки.

Выводы

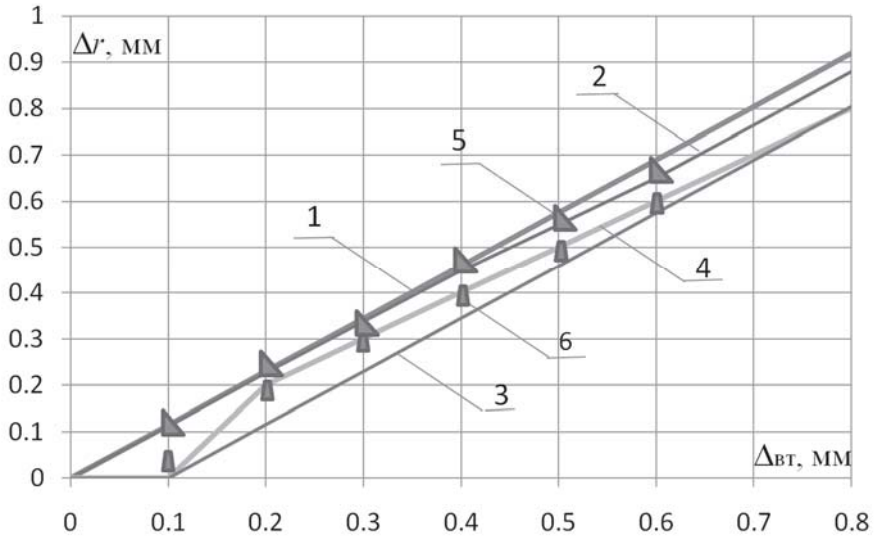
В широком диапазоне допусков на изготовление соединяемых деталей трехэлементное прессовое соединение позволяет обеспечить точность базирования узлов. Так при сборке

пакета штампа удалось обеспечить свободное скольжение втулок по направляющим колонкам, при этом точность вырубаемых деталей с использованием этого пакета штампа соответствовала *IT*7-*IT*8.



1 – значения, полученные на основе выражения (1); 2, 3 – результаты расчетов МКЭ;
4 – значения, полученные на основе выражения (2); 5, 6 – экспериментальные значения.

Рисунок 2 – зависимость смещения Δ*r* оси охватываемой детали от разностенности втулки $\Delta_{вт}$ (для случая $z_м$ = 0,4 мм, d = 10 мм) для исходной втулки (1, 2, 5) и усеченной под углом α (3, 4, 6)



1 – значения, полученные на основе выражения (1); 2, 3 – результаты расчетов МКЭ;
4 – значения, полученные на основе выражения (2); 5, 6 – экспериментальные значения.

Рисунок 3 – зависимость смещения Δ*r* оси охватываемой детали от монтажного зазора $z_м$ (для случая $\Delta_{вт}$ = 0,4 мм, d = 10 мм) для исходной втулки (1, 2, 5) и усеченной под углом α (3, 4, 6)

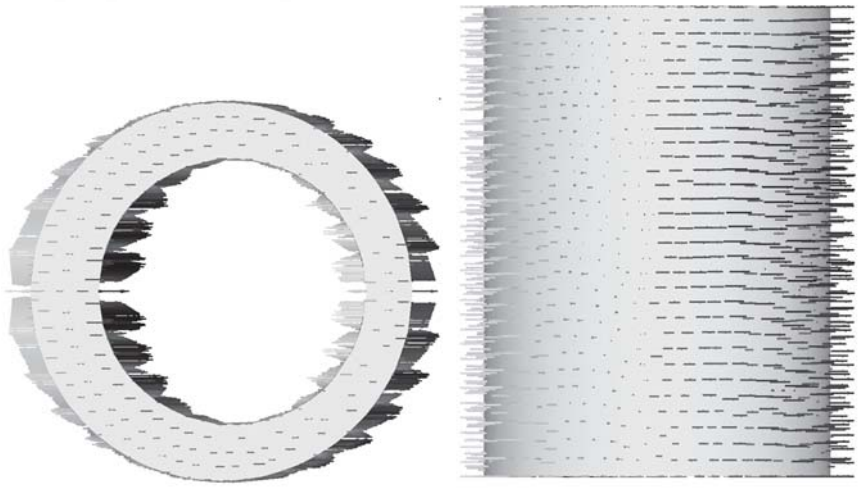


Рисунок 4 – Направление смещения узлов конечно-элементной сетки промежуточной втулки при сборке соединения (проекция на ось Ox)

Список литературы

1. Использование пластически деформируемых элементов при сборке соединений с натягом / А. А. Демин, И. А. Титов // Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). – 2012. – №3. – С. 12–15.
2. Патент 2481938 МПК B23P 11/02 Российская Федерация Прессовое соединение охватываемой втулки с охватывающей корпусной деталью / Демин А. А, Титов И. А // Бюл. – 2013. – №14.
3. Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. / А. М. Дальский, А. Г. Суслова, А. Г. Косилова и др. ; Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой и др.– 5-е издание, исправленное. – М.: Машиностроение, 2003. – 1т.

EFFECT OF ERROR OF SIZES AND SHAPES OF MATING SURFACES ON THE BUILD QUALITY PRESS CONNECTION

Demin A. A., Engineer, presskov@mail.ru
Titov I. A., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: titiv@bti.secna.ru

Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU или BTI AltSTU

Abstract: One of the promising ways of increasing the quality of the assembly press connection is a plastic deformation of one of the collected details or intermediate element, as plastic deformation can compensate for errors of form and dimensions of the parts. Assembling plastic deformation reduces the cost of connection parts due to the partial exclusion from the process of their manufacturing labor-intensive finishing operations. In the scientific literature no studies dedicated to the assembly of precision pressing compounds containing plastically deformable element with a variable distribution of mechanical properties. These studies were obtained analytical expressions for the accuracy of the assembly according to the nonuniform intermediate deformable sleeve and on the accuracy of the male and female parts. To test the adequacy of the obtained expressions were experimental studies and modeling of the assembly joints by finite element method. The proposed method allows a high assembly precision based nodes of pieces in a wide range of manufacturing tolerances of the parts press connection.

Keywords: assembling, pressing compound, strength, precision gap.

УДК 621.9 (0.45)

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ОТВЕРСТИЙ ТОНКОСТЕННЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

В. А. КАЛИСТРУ, аспирант,
А. М. ФИРСОВ,кандидат тех. наук, доцент,
(БТИ (филиал) АлтГТУ, г.Бийск)

Калистру В.А. – г. Бийск, ул. Трофимова 27,
Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова,
тел.8(3854) 43-53-02, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

Аннотация: В работе предложен метод прогнозирования отклонений точности формы базовых отверстий из-за тепловых деформаций (ТД) на стадии проектирования технологического процесса. Предложенный метод управления технологическим процессом состоит из двух этапов: первый этап (вспомогательный) основан на методе конечных элементов (МКЭ), второй (основной) на моделировании искусственной нейронной сети (ИНС). Разработан алгоритм расчета входных и выходных параметров данной сети при помощи LS-DYNA. Разработана структура ИНС для прогнозирования и корректировки траектории движения инструмента на стадии подготовки технологического процесса для изделий входящих в группы деталей близких по конструктивным признакам

Ключевые слова: тепловая деформация, корпусные детали, точность формы, искусственные нейронные сети, метод конечных элементов.

1. Введение

При конкурентной борьбе, любое предприятие должно ориентироваться на выпуск качественной продукции, которая должна удовлетворять требованиям заказчика и потребителя. Достижению этих целей способствуют применение современных технологий в области компьютерного моделирования. Использование искусственных нейронных сетей в комплексе с методом конечных элементов позволит улучшить такие показатели как точность изготовления и качества поверхности детали.

В современных условиях производства, механическая обработка резанием все еще не удовлетворяет необходимым требованиям, что приводит к включению в технологический процесс дорогостоящих финишных операций. Поэтому совершенствования лезвийной обработки за счет применения информационных технологий позволяющих повысит производительность и обеспечить высокое качество изделий, является актуальной задачей.

Объектами исследования были выбраны базовые отверстия тонкостенных корпусных деталей, т.к. к ним предъявляются высокие требования по точности размеров (6-8 квалитет), отклонению формы (4-5 степень), шероховатости поверхности (Ra=1,6-0,08 мкм) (рисунок 1) [1]. Тонкостенные корпусные детали, в целях облегчения массы, изготавливаются литьем из алюминиевых сплавов. При охлаждении отливок из-за разной толщины стенок, образуется неоднородная структура, неоднородная твердость, что приводит при обработке к формированию нестабильных механических свойств поверхности, разной шероховатости и к отклонению размеров и формы поверхности. Точность формы является одним из важных требований в обработке базовых отверстий корпусных деталей, выполняющих функцию направляющих поверхностей, т.к. к ним предъявляются повышенные требования по износостойкости.

В предыдущей работе [2], были проведены исследования и выявлено, что значительное влияние на общую погрешность обработки формы отверстий оказывают тепловые деформации. Для тонкостенных деталей с переменной толщиной стенки погрешности, связанные с тепловой деформацией, могут составлять до 70%. Следовательно, снижение теплообразования при резании и, соответственно, уменьшение ТД заготовки возможно, в основном, путем уменьшения режимов обработки, что приводит к снижению производительности. Таким образом, необходимо прогнозировать величину тепловой деформации на стадии проектирования технологического процесса с использованием комплексного подхода, который состоит из двух этапов: первый этап (вспомогательный) основан на методе конечного элементного анализа (LS-

DYNA), второй (прогнозирующий) этап основанна обучении и построении нейронной сети (Statistica Neural Networks).

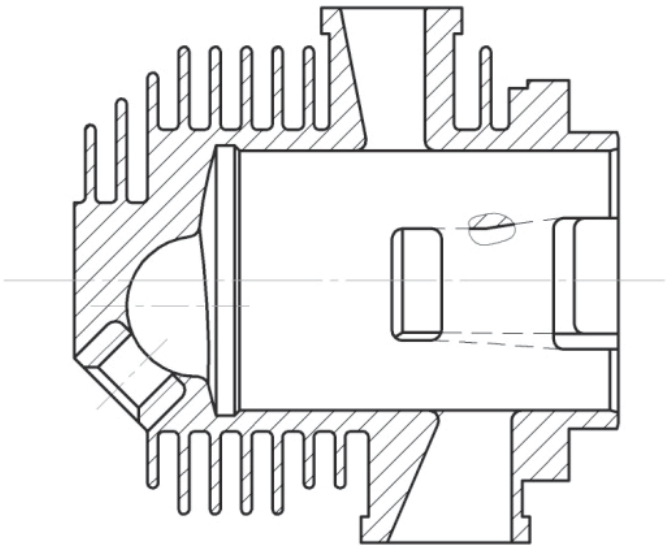


Рисунок 1 – Тонкостенная корпусная деталь.

2. Теория

Анализ в LS-DYNA упрощает и автоматизирует лишь расчет необходимых параметров, но имеет ряд недостатков: значительно увеличивается длительность подготовки технологического процесса, даже на современных компьютерах расчеты ведутся немалое время; сложный подготовительный этап; требуется высокая квалификация специалистов. Поэтому этап расчета по методу МКЭ носит вспомогательный характер и нужен для расчета входных и выходных параметров искусственной нейронной сети, используемой для прогнозирования отклонений точности формы отверстий.

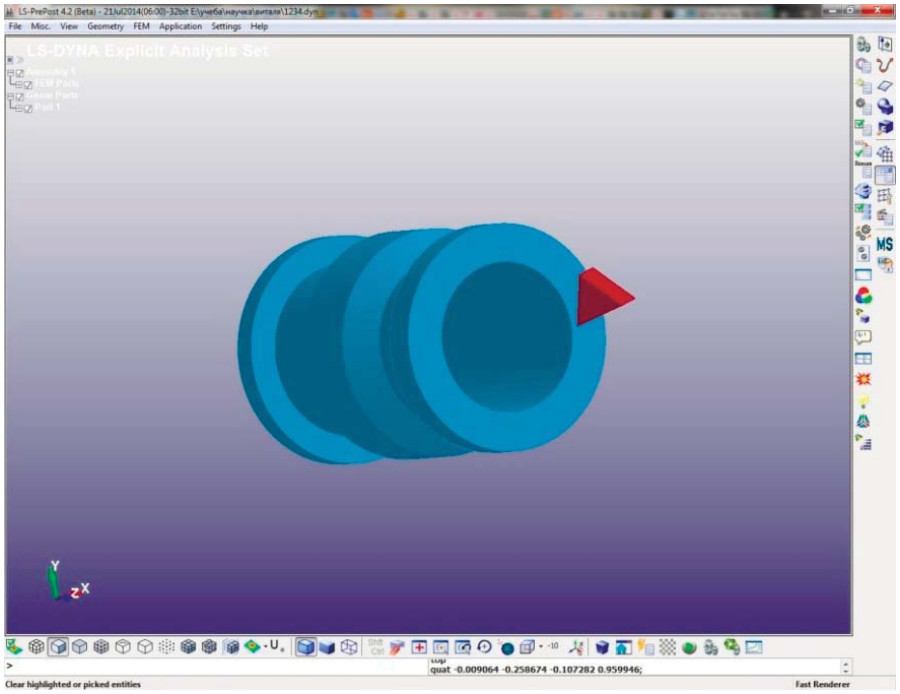


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель с заданными условиями.

Для этого выбирается одна деталь, по которой строятся упрощенные модели (обучающая выборка), включающие в себя следующие характеристики: диаметр отверстия (D), длинна отверстия (L), разность между минимальной и максимальной толщиной стенки (a), материал заготовки, материал режущего инструмента. Для повышения производительности расчета, вместо режущего инструмента используется режущий клин, т.к. ТД рассчитывается только для заготовки (рисунок 2).

Алгоритм строится следующим образом:

Вспомогательный этап.

1) Построение 3D модели и режущего инструмента (режущей пластины).

2) Генерация сетки

3) Экспорт в LS-DYNA и задание свойств материала и условий контакта.

4) Задание координат траектории движения инструмента и частоты вращения заготовки (режимы резания).

5) Выполнение упругопластического анализа (перемещение инструмента и вращение заготовки).

6) Расчет температуры заготовки в зоне резания. Определение значения тепловой деформации.

7) Анализ деформаций и отклонения формы базового отверстия тонкостенной корпусной детали.

8) Если отклонение выше допустимого, то возвращаемся в пункт 4.

Если отклонение находится в пределах допустимого, то создается файл с данными и экспортируется в базу данных, а оттуда уже заполняется модель ИНС и проводится обучение.

Основной этап.

По результатам вспомогательного этапа, строится искусственная нейронная сеть, состоящая из 12 независимых параметров, которые подаются на вход: подача (s), скорость резания (V), глубина (t), материал режущей части, материал заготовки, диаметр отверстия (D), разность между минимальной и максимальной толщиной стенки (a), длина отверстия (L), коэффициент прерывистости (Кпр), твердость детали, теплопроводность материала заготовки, температура в зоне резания (T). Смазочно-охлаждающая жидкость будет применяться во время всей обработки.

На выходе будем иметь четыре скорректированных параметра: подача (dS), глубина резания (dt), скорость резания (dV), допустимая тепловая деформация (dT).

В дальнейшем проводится тестирование сети с подачей на вход значений входных параметров, не участвующих в обучающей выборке, и сравниваются результаты отклика ИНС с тестовыми значениями выходных данных. Анализируется фактическое значение допустимой тепловой деформации, и значение тепловой деформации высчитанной при помощи ИНС, если погрешность в пределах допустимого, то выводится программный код данной сети на одном из языков программирования (например, C++). Разрабатывается программа, ядро которой состоит из кода нейронной сети, а интерфейс служит для ввода расчетных параметров и получения скорректированных режимов резания.

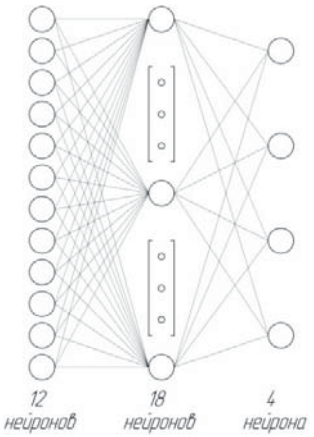


Рисунок 3 – Структура искусственной нейронной сети для прогнозирования отклонений формы отверстия.

3. Результаты и обсуждение

При прогнозировании величин ТД метод, основанный на ИНС, способен учитывать не только большое количество факторов, но и их взаимное влияние друг на друга. Он, теоретически, имеет возможность аппроксимации сколь угодно сложных зависимостей, что позволяет выполнять прогнозирование точности обработки напрямую в зависимости от значений входных параметров процесса. Недостатками данно-

го метода являются: использование однотипных инструментальных материалов и материалов заготовки (в нашем случае твердые сплавы различных марок и алюминиевые сплавы различной твердости и плотности). Поэтому прогнозирование технологического процесса обработки базовых отверстий тонкостенных корпусных деталей при помощи данной нейронной сети будет работать в границах группы деталей близких по конструктивным признакам

4. Вывод

Предложенная методика позволит на стадии проектирования технологического процесса корректировать траекторию движения режущего инструмента на основе температурных деформаций заготовки, когда не обеспечивается запас технологической точности, т.е. существует вероятность брака из-за превышения погрешности обработки допустимой величины. Применения метода ИНС позволит сократить время технологической подготовки при проектировании группового технологического процесса.

Список литературы

1. *Татаркин Е.Ю.* Обеспечение точности отверстий при обработке малогабаритных корпусных деталей на токарных станках [Текст]. / Татаркин Е.Ю., Фирсов А.М. //Ползуновский вестник, 1/1-2012. – С. 286-290

2. *Калистру В.А.* Проблема технологического обеспечения точности формы отверстий тонкостенных корпусных деталей / В.А. Калистру, А.М. Фирсов// Актуальные проблемы в машиностроении: материалы второй международной научно-практической конференции – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015.– С. 92-95.

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN FORECASTING ACCURACY OF A HOLE SHAPE OF THIN-WALLED BODY PARTS

Kalistru V.A., graduate student, e-mail: mrsi@bti.secna.ru
Firsov A.M., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail:mrsi@bti.secna.ru
Biysk technological Institute (branch) Altai state technical University n.a. I. I. Polzunov, Biysk, Trofimova street, 27, phone 8(3854) 43-53-02, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

Abstract: In this paper is proposed a method to predict deviations of accuracy of a basic shape of holes due to a thermal deformation (TD) at the design stage of the technological process. Proposed method of control of technological process consists of two stages: the first stage (auxiliary) is based on the finite element method (FEM), the second (main) - on the modeling of artificial neural network (Ann). In this paper is developed an algorithm of calculation of input and output parameters of the network using LS-DYNA. A structure of the Ann to predict and to adjust a trajectory of a movement of a tool at the preparation stage of the technological process for work pieces included in group process is invented in this article.

Keywords: thermal deformation, body parts, accuracy of shape, artificial neural networks, finite element method.

УДК 621.787:621.91

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УПРОЧНЯЮЩЕ-ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКЕ

В.П. ГИЛЕТА, канд. техн. наук, доцент,
А.И. БЕЗНЕДЕЛЬНЫЙ, канд. техн. наук, доцент,
В.Б. АСАНОВ, канд. техн. наук, доцент,
(НГТУ, г. Новосибирск)

Гилета В.П. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: gileta.viktor@yandex.ru

Аннотация: Исследовано влияние износа ультразвукового инструмента из твердого сплава марки ВК8 на качество поверхностного слоя деталей, изготовленных из стали ШХ15. Установлено, что появление площадки износа приводит к снижению чистового и упрочняющего эффекта. Изнашивание инструмента изменяет характеристики качества поверхностного слоя детали: с увеличением площадки износа снижается микротвердость и глубина упрочнения и возрастает шероховатость поверхности и содержание остаточного аустенита. Показано, что размер площадки износа и ее морфология зависят от пути трения, предопределяя технологическую стойкость инструмента и качество обрабатываемой поверхности. На основании полученных зависимостей содержания остаточного аустенита, микротвердости, глубины упрочнения, шероховатости поверхности от пути трения и размера площадки износа инструмента представляется возможность получать требуемое качество обрабатываемой поверхности при ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработке по физико-механическим и геометрическим параметрам.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование ультразвуковым инструментом (УЗО), деформатор, износ, материал, режимы, качество поверхностного слоя, шероховатость поверхности, микротвердость, статическая нагрузка, амплитуда, площадка износа, морфология поверхности.

1. Введение

Поверхностное пластическое деформирование с наложением ультразвуковых колебаний на инструмент (УЗО) осуществляется для получения чистового или упрочняющего эффекта в поверхностном слое детали. В зависимости от назначения детали может быть получен одновременно и упрочняюще-чистовой эффект. Это позволяет использовать УЗО для широкого класса деталей машин и приборов, работающих в разнообразных эксплуатационных условиях (изнашивании, коррозии, усталостных нагружениях и др.) [1-2].

Качество поверхностного слоя детали и производительность этого процесса предопределяются многими факторами [3, 4], в том числе износостойкостью деформаторов, изготавливаемых из закаленных сталей, твердых сплавов и сверхтвердых материалов.

Исследованию износа деформатора и его влиянию на качество поверхности при УЗО посвящена настоящая статья.

Для получения ответа на этот вопрос необходимо определиться с выбором материалов деформатора и обрабатываемой детали, режимами УЗО, критериями износа и параметрами качества поверхности.

2. Материалы, оборудование и методика экспериментального исследования

Изнашивание деформатора производилось на деталях, изготовленных из высокоуглеродистой стали ШХ15 и подвергнутых закалке и низкому отпуску.

Выбор этой стали обуславливается следующим: она широко распространена в машиностроении, обладает значительной истирающей способностью, что сокращает время проведения испытаний.

В качестве образцов для испытаний на изнашивание были выбраны наружные кольца роликового железнодорожного подшипника с твердостью HRC 60…62, с микротвердостью поверхности HV = 7800 МН/м^2 и исходной шероховатостью Ra = 0,63 мкм.

Исследования проводились с использованием модернизированного станка 1К62, оснащенного приспособлением для УЗО и специальными приставками для изучения износа. Источником колебаний служил ультразвуковой генератор УЗГ-10-22 с магнитострикционным преобразователем ПМС-15А-18. Амплитуда колебаний инструмента определялась оптическим методом. Статическая сила прижатия инструмента к детали создавалась тарированными грузами. Режимы обработки выбирались исходя из получения качества поверхностного слоя: статиче-

ская нагрузка Рст=300 Н; двойная амплитуда колебаний инструмента 2А = 40 мкм; частота колебаний f = 18 кГц, скорость обработки V = 50 м/мин; подача инструмента S= 0,07 мм/об; радиус деформатора r = 5 мм. В качестве СОЖ использовалось масло «Индустриальное 45».

Изнашивание инструмента оценивалось по размеру площадки износа. Площадка износа измерялась в двух направлениях: подачи и скорости главного движения и в расчет принималась средняя величина. Измерение осуществлялось с помощью лупы Бринелля при увеличении х24 с погрешностью измерения ± 0,05 мм и специальной измерительной приставкой, устанавливаемой непосредственно на суппорте станка с точностью измерения ± 0,005 мм.

Исследования закономерностей изнашивания предъявляют высокие требования к точности формы, размеров и шероховатости поверхности деформаторов, которые обеспечивались профилированием рабочей части инструмента электрохимическим методом и последующей доводкой алмазными пастами. Окончательно поверхность сферы деформатора выполнялась с отклонениями формы профиля ±0,01 мм и шероховатостью R_z = 0,30 мкм.

Исследование микрогеометрии поверхности детали проводилось с применением профилографа-профилометра модели 252, а площадки износа с использованием микроинтерферометра МИИ-4. Глубина упрочнения и количество остаточного аустенита в поверхностном слое детали оценивались при послойном снятии тонких слоев электрохимическим полированием. Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере ПМТ-3. Содержание остаточного аустенита определялось рентгеновским методом. Морфология площадки износа изучалась с использованием оптического микроскопа МИМ-8М и электронного микроскопа EF-4 с помощью реплик.

3. Результаты и обсуждение

Исследования показали, что износ при УЗО подчиняется общим закономерностям изнашивания твердых тел, для которых характерно наличие участка приработки и участка установившегося износа [5].

Износ деформатора проявляется в изменении геометрической формы его рабочей части. На исходной сферической поверхности деформатора при УЗО формируется практически плоская площадка износа, размеры которой растут с увеличением пути трения (рис. 1). Появление площадки износа изменяет силовое поле, что приводит к изменению физико-механического и геометрического состояния поверхностного слоя детали. Пластическая деформация при УЗО обуславливает частичное копирование морфологии поверхности площадки износа на обрабатываемую поверхность. Поэтому изучение закономерностей изменения рабочей части деформатора при УЗО и его морфологического состояния имеет важное практическое значение, позволяющее обоснованно назначать режимы УЗО и технологическую стойкость инструмента.

Проведенные исследования по выбору материала деформатора показали, что из рассмотренного ряда ВК8, ВК4М, ВК8М, ВК2, Т15К6, ВК60М, ВК15, Т30К4, Р18, Р6М5, ШХ15 наибольшей износостойкостью в условиях УЗО обладает твердый сплав ВК8 [5]. Поэтому дальнейшие исследования были проведены при оснащении ультразвукового волновода деформаторами из ВК8.

Закономерности изнашивания деформатора и морфологическое состояние площадки износа определяются набором механизмов износа, которые присущи данному процессу обработки.

Анализ состояния обрабатываемой поверхности и площадки износа деформатора позволили установить, что такой вид износа, как адгезионный не характерен для ВК8 при УЗО стали ШХ15. Следов налипания инородных материалов на поверхности деформатора и обрабатываемой детали не обнаружено (рис. 2).

Рентгеновский микроанализ показал, что содержание и распределение вольфрама и кобальта на площадке износа соответствует новым деформаторам. Следовательно, диффузионный износ также не является характерным для твердого сплава ВК8 при УЗО.

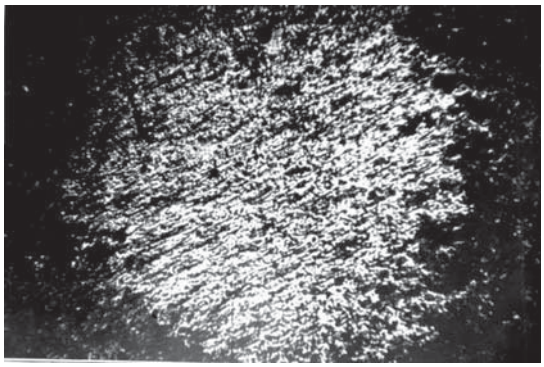


Рисунок 1- Площадка износа деформатора из твердого сплава ВК8



Рисунок 2 - Морфология поверхности площадки износа деформатора из ВК8. реплика, х7000

Изучение поверхностей площадки износа (рис. 3) и обрабатываемой детали (рис. 4) не выявили явных следов абразивного износа. Это говорит о том, что на выбранном (диапазоне) режиме УЗО и допустимых размерах площадки износа, интенсивного разрушения карбидов вольфрама не происходит. Минимизации доли абразивного изнашивания также способствуют кавитационные процессы, протекающие в СОЖ в зоне контактного взаимодействия, которые обеспечивают удаление продуктов износа [6].

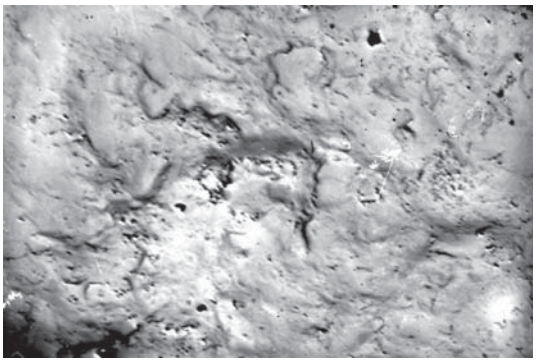


Рисунок 3 - Поверхность износа деформатора из твердого сплава ВК8 реплика, х7000

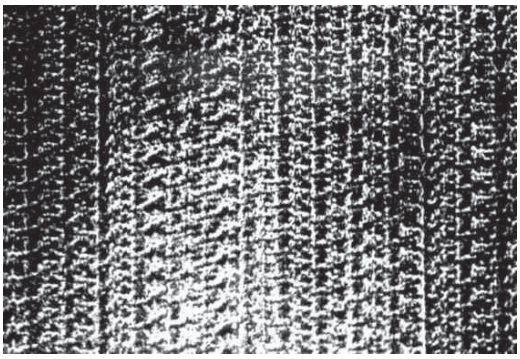


Рисунок 4 - Морфология поверхности обрабатываемой детали

С ростом площадки износа на ее поверхности формируется волнообразный профиль, с расположением волн перпендикулярно вектору скорости (рис. 5). Такой рельеф площадки износа говорит о том, что при УЗО имеет место и деформация твердого сплава, которая в первую очередь вызывает течение кобальтовой связки, обуславливающее замазывание зерен карбида вольфрама и закрытие его острых граней.

Дальнейший рост площадки износа, приводит к значительному ухудшению качества поверхностного слоя обрабатываемой детали и сопровождается изменениями морфологических состояний контактирующих поверхностей. Это является следствием накопления деформаций в твердом сплаве, приводящим к разрушению карбидной фазы. Процессы разрушения обуславливают появление острых режущих граней WC на поверхности площадки износа (рис. 6), что приводит к возникновению процесса микрорезания при обработке. Исследованиями установлено, что такое морфологическое состояние поверхности деформатора не допустимо с точки зрения формирования качества поверхностного слоя детали.

Влияние износа деформатора на качество поверхностного слоя детали оценивалось по изменению шероховатости поверхности Ra, микротвердости HV, глубины упрочнения t, содержанию остаточного аустенита A (рис. 7). Наиболее чувствительной к износу инструмента является микротвердость, менее чувствительна – глубина упрочнения. Микротвердость по глубине распределяется неравномерно, максимальное ее значение наблюдается на поверхности (рис. 8).

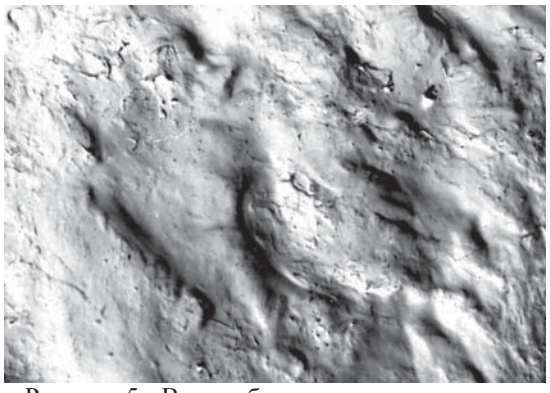


Рисунок 5 - Волнообразования на площадке износа реплика, х7000

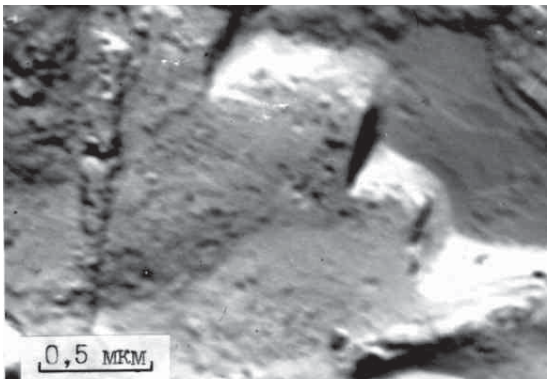


Рисунок 6 - Разрушение карбидов WC

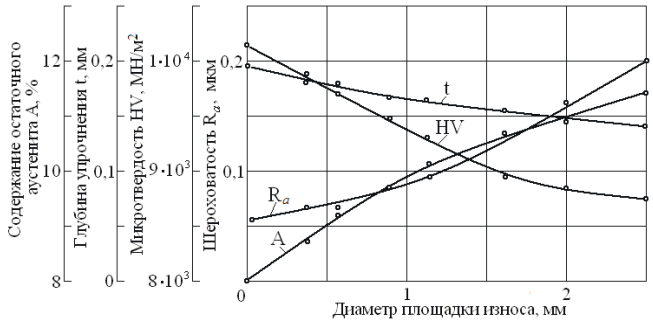


Рисунок7 - Зависимость характеристик качества поверхностного слоя деталей от износа рабочей части инструмента



Рисунок 8 - Распределение микротвердости по глубине:
1 – исходное состояние (шлифование);
2 – УЗО новой сферой радиусом r = 5 мм;
3 – УЗО с площадкой износа диаметром 2 мм

Распределение остаточного аустенита по глубине подчиняется закономерностям, представленным на рис. 9. Изменения шероховатости, микротвердости, глубины упрочнения и остаточного аустенита от пути трения (времени обработки) показаны на рис. 10. Наиболее резкий характер изменения параметров качества поверхностного слоя наблюдается в начальный период обработки и объясняется формированием площадки износа.

4. Выводы:

1. Изнашивание инструмента приводит к снижению чистового и упрочняющего эффекта в поверхностном слое обрабатываемой детали. С увеличением площадки износа снижаются микротвердость и глубина упрочнения, увеличиваются шероховатость поверхности и содержание остаточного аустенита.

2. Размер площадки износа и ее морфология зависят от пути трения, предопределяя технологическую стойкость инструмента и качество обрабатываемой поверхности.

3. Обработку УЗО целесообразно осуществлять на участках приработки и установившегося (нормального) износа инструмента до допустимой величины площадки износа, определяемой требованиями к качеству поверхностного слоя детали.



Рисунок 9 - Содержание остаточного аустенита в поверхностном слое:
1 – исходное состояние (шлифование);
2 – УЗО новой сферой радиусом r = 5 мм;
3 – УЗО с площадкой износа диаметром 2 мм

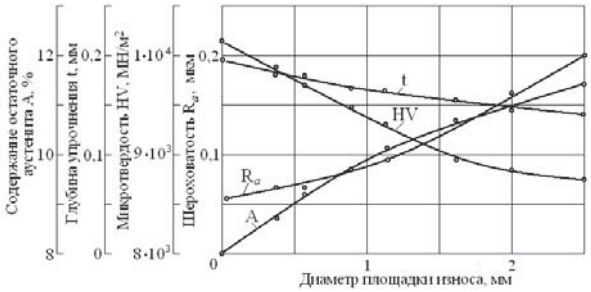


Рисунок 10 - Зависимость качества поверхностного слоя детали от пути трения (времени обработки)

Список литературы

1. *Гилета В.П.* Упрочняюще-чистовая обработка деталей двигателя внутреннего сгорания (ДВС) / В.П. Гилета, В.Б. Асанов, А.И. Безнедельный // Материалы VI Межд. науч.-техн. конф. «Инновации в машиностроении – основа технологического развития России», Барнаул, 2014.- С. 118-123.

2. *Гилета В.П.* Повышение стойкости вытяжных пуансонов / В.П. Гилета, В.Б. Асанов, А.И. Безнедельный // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). -2007. - № 4 (37). - С. 11-12.

3. *Рахимянов Х.М.* Технологическое обеспечение геометрических параметров качества поверхности при ультразвуковом пластическом деформировании / Х.М. Рахимянов, Ю.С. Семенова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. - № 3. – С. 33-36.

4. *Безнедельный А.И.* Влияние технологической наследственности на формирование качества поверхностного слоя закаленных деталей при упрочняюще-чистовой обработке ультразвуковым инструментом / А.И. Безнедельный, В.Б. Асанов, В.П. Гилета // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2012. -№ 4 (57). - С. 19-22.

5. *Гилета В.П.* Выбор материалов деформаторов для упрочняюще-чистовой обработки ультразвуковым инструментом/ В.П. Гилета, А.И. Безнедельный, В.Б. Асанов / Труды второй межд. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы в машиностроении», Новосибирск, 2015.- С. 163-168.

6. *Гилета В.П.* Влияние СОЖ и присадок на износ инструмента при ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработке/ В.П. Гилета, А.И. Безнедельный, В.Б. Асанов // Труды второй межд. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы в машиностроении», Новосибирск, 2015.- С. 158-163.

WEAR RESISTANCE OF THE TOOL AND SURFACE CONDITION UNDER ULTRASONIC REINFORCING FINISHING PROCESS

Gileta V.P., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: gileta.viktor@yandex.ru
Beznedelnyy A.I., C.Sc. (Engineering), Associate Professor,e-mail:beznedelnyy@corp.nstu.ru
Asanov V.B., C.Sc. **(**Engineering), Associate Professor, e-mail: asanov@ corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract: The influence of wear of the ultrasonic tool made of VK8 hard metal on the surface condition of the details made of ШХ15 steel was studied. It was found that the occurrence of fret leads to decrease of finishing and reinforcing effects. Tool wear changes characteristics of the condition of the detail surface layer: the fret increase leads to the decrease of microhardness and depth of strengthening, whereas surface roughness and retained austenite increase. It was shown that the fret size and its morphology depend on friction path predetermining technological tool life and the condition of the treated surface. Based on the acquired dependences of the retained austenite and roughness of the surface on the friction paths and the fret size on the tool, it is possible to obtain the demanded condition of the treated surface under the reinforcing finishing treatment with ultrasonic instrument according to the physical-mechanical and geometrical parameters.

Key words: surface plastic deformation with the ultrasonic tool (UT), deformator, wear, material, processing conditions, condition of the surface layer, surface roughness, microhardness, static load, amplitude, fret, surface morphology.

УДК 621.914

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.А. ХОМЕНКО, доктор техн. наук, профессор,
П.О. ЧЕРДАНЦЕВ, канд. техн. наук,
А.О. ЧЕРДАНЦЕВ, магистр техники и технологии

Черданцев А.О. – 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: hypertigr@mail.ru

Аннотация: На основании результатов имитационного моделирования процесса торцового фрезерования проведён анализ зависимости качества обработанной поверхности от режимов резания. Отмечено, что при торцовом фрезеровании возникает отклонение формы обработанной поверхности в виде выпуклости. Кроме того, на величину шероховатости обработанной поверхности влияет значение отношения подачи к частоте вращения шпинделя. Данные выводы подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: торцовое фрезерование, имитационное моделирование, топография, качество обработанной поверхности, режимы резания.

1. Введение

Технологическое обеспечение требуемого качества изделий с одновременным снижением себестоимости механической обработки является одной из важнейших задач машиностроения. Геометрические параметры качества фрезеруемой поверхности, в частности, шероховатость, оказывают влияние практически на все эксплуатационные свойства деталей. Для оценки шероховатости используют высотные, шаговые параметры и параметры формы. При условии соблюдения жёсткости технологической системы режимы резания и конструктивно-геометрические параметры режущего инструмента являются определяющими факторами при формировании топографии обработанной поверхности.

При изучении таких сложных процессов как формообразование поверхности при торцовом фрезеровании одним из наиболее эффективных методов исследования является имитационное моделирование. Имитационные модели позволяют описывать развитие моделируемого процесса во времени, что делает возможным с их помощью проводить вычислительные эксперименты. Вычислительные эксперименты позволяют анализировать зависимость шероховатости поверхности от различных параметров процесса торцового фрезерования, при этом, в отличие от реальных экспериментов, практически не требуя финансовых и временных затрат.

Таким образом, прогнозирование качества обработанной поверхности с использованием имитационной математической модели процесса торцового фрезерования, которое может быть положено в основу методики проектирования операций торцового фрезерования, является актуальным.

2. Материалы и методы исследования

Для проведения численных экспериментов нами была разработана имитационная математическая модель процесса торцового фрезерования. Структура модели приведена на рисунке 1.

В состав модели входят следующие модели: модель обрабатываемой поверхности; модели режущих кромок; модель фрезы; модель кинематики фрезерования; модель процесса резания; модель пластических деформаций; модель сил резания; модель вибраций; модель износа зубьев. Все эти модели связаны друг с другом информационными потоками и взаимодействуют на каждом шаге итерационного расчета по времени.

Результат моделирования представляется в виде топографической карты микронеровностей, которая несет в себе всю информацию о геометрических параметрах качества поверхности.

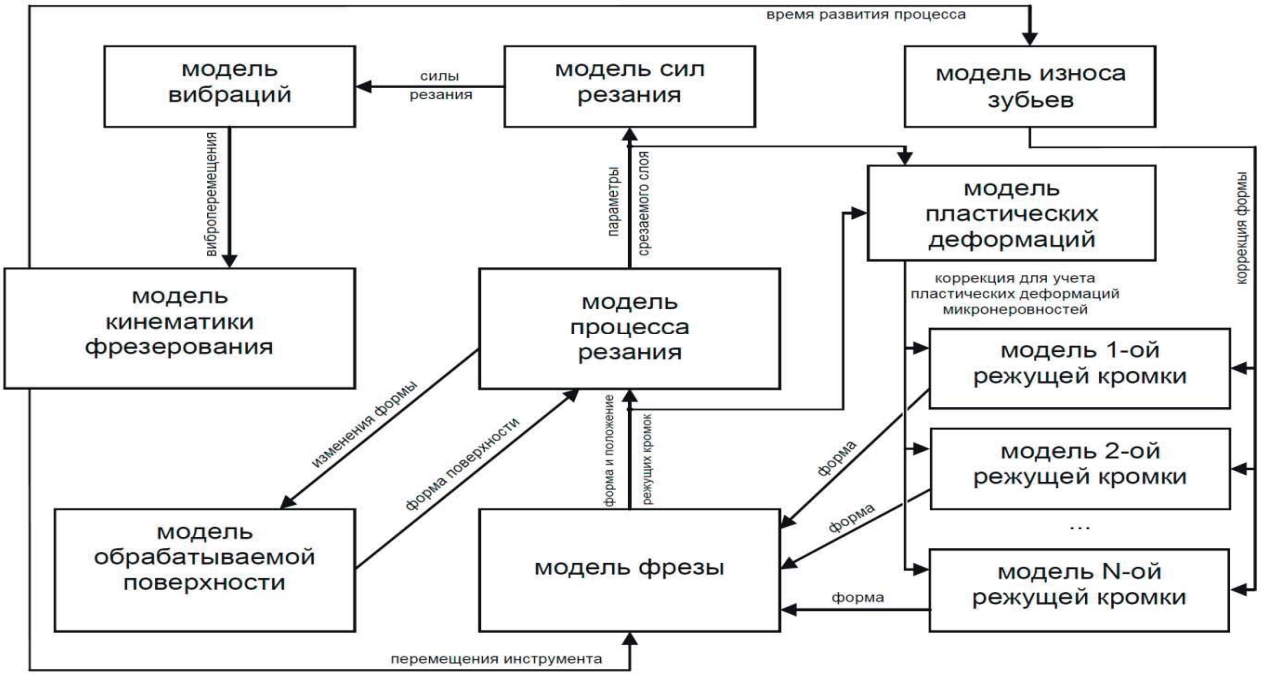


Рисунок 1 – Структура имитационной модели

С помощью модели были проведены численные эксперименты с целью исследования связи геометрических параметров качества обработанной поверхности с конструктивно-геометрическими параметрами инструмента и режимами резания при торцовом фрезеровании.

По результатам исследований выявлено, что общие закономерности формирования микрорельефа обработанной поверхности сохраняются для различных режимов резания, конструкций фрез и обрабатываемых материалов. Ниже приведены результаты полученные при моделировании обработки стали 45 торцовой фрезой, имеющей диметр 50 мм, 4 зуба, φ=67°, γ_p=5°, γ_o=5°, ε=108°, r=0,8 мм, материал режущей части – Т15К6, минутная подача 1600 мм/мин, частота вращения шпинделя 400 об/мин, глубина резания 1 мм. Режим резания выбран для удобства анализа закономерностей и представления результатов исследований.

На топограмме обработанной поверхности (рисунок 2) ось ординат совпадает с направлением движения подач, диапазон по оси абсцисс соответствует ширине фрезерования B, равной диаметру фрезы. Значения высот микронеровностей отображены цветом.

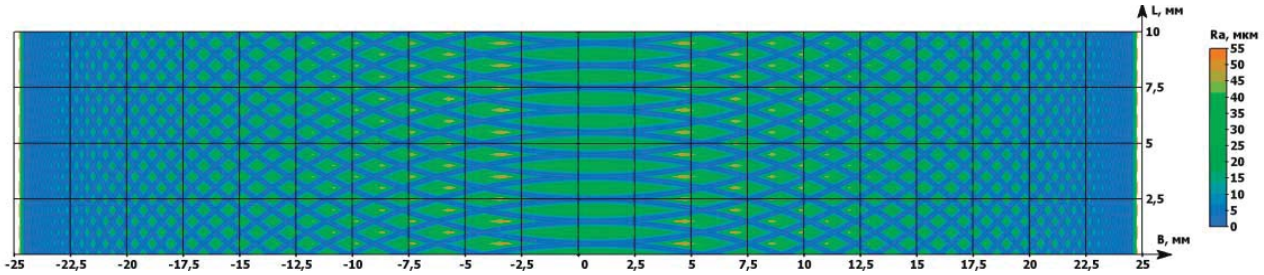


Рисунок 2 – Топограмма обработанной поверхности

Анализируя приведенную топограмму, можно сделать вывод о том, что для разных положений трасс измерения шероховатости действительно будут получены различные значения. Наглядно это отражено на рисунке 3, где приведена связь высотных параметров (ось ординат), измеренных вдоль линий параллельных подачи, и положения сечения относительно полной ширины фрезерования (ось абсцисс).

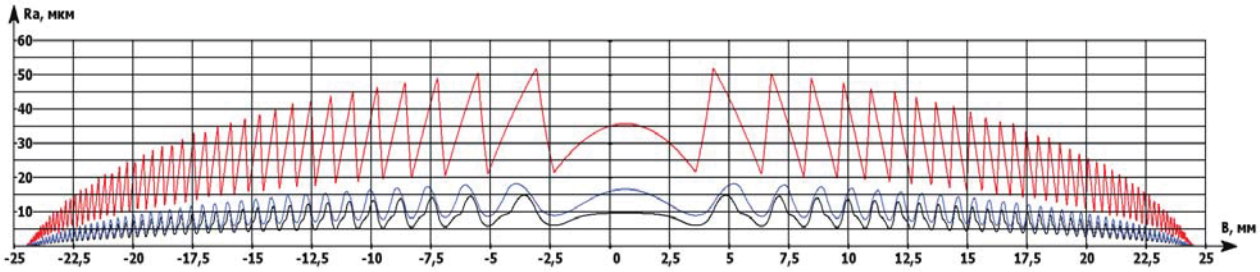


Рисунок 3 – Высотные параметры шероховатости (сверху вниз: Rmax, m, Ra)

Анализ графика (рисунок 3) позволяет сделать вывод о том, что поверхность получает отклонение формы, определяемое спецификой торцового фрезерования. Данное отклонение представляет собой выпуклость, которая может быть посчитана как разница между ординатой пересечения огибающей с границей ширины фрезерования и максимальным значением огибающей. Другой особенностью топографии полученной торцовым фрезерованием является снижение шероховатости в периферийной области, что объясняется влиянием как кинематики резания, так и более благоприятными условиями резания в условиях меньшей толщины срезаемого по периферии слоя.

Еще одним важным параметром качества поверхности является относительная опорная длина профиля на некотором уровне. Карта распределения значений относительной опорной длины профиля в зависимости от положения сечения и уровня p (рисунок 4) показывает значительные изменения этого параметра для относительно близко расположенных сечений.

Среднее арифметическое отклонение профиля зависит как от положения трассы профилографирования, так и от её направления (рисунок 5). Наибольшие значения среднего арифметического отклонения находятся по краям центральной зоны (при измерении параллельно движению подач).

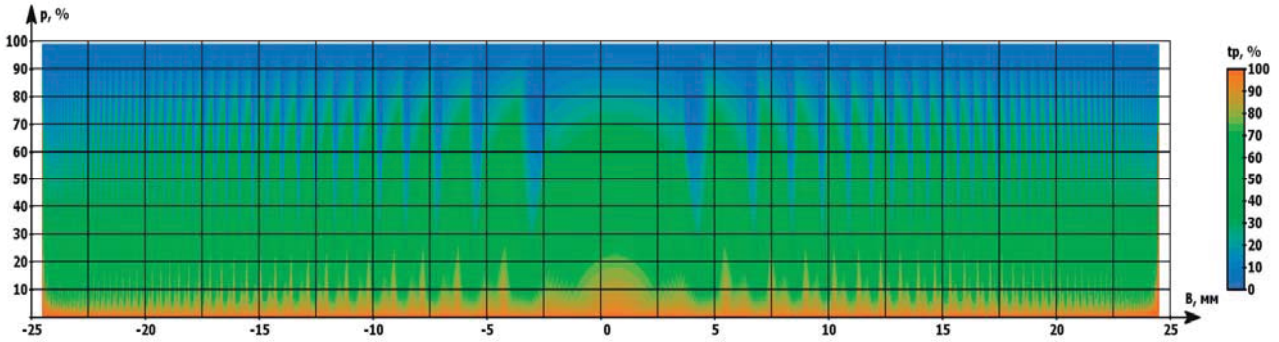


Рисунок 4 – Распределение относительной опорной длины профиля

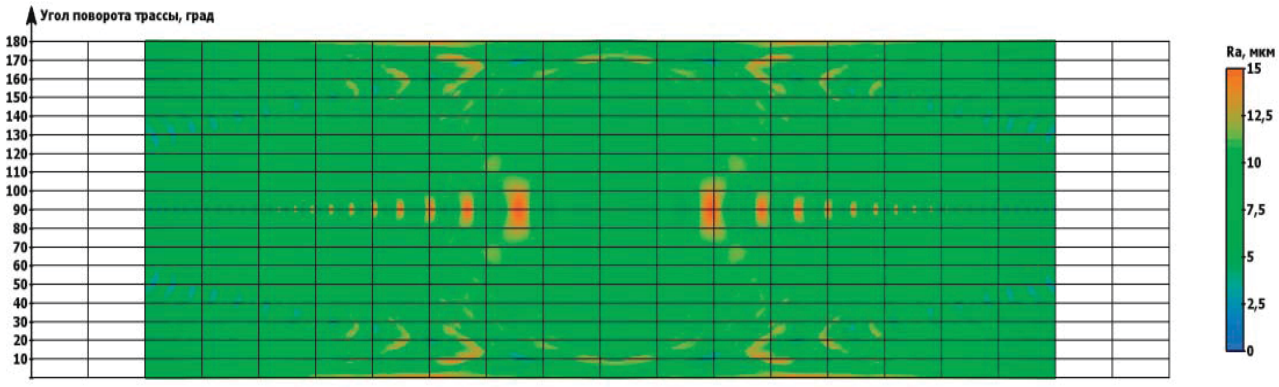


Рисунок 5 – Распределение среднего арифметического отклонения профиля

Выявлено, что центральная область поверхности после торцового фрезерования может иметь значительно отличающуюся шероховатость при относительно мало изменяющемся значении отношения подачи к частоте вращения шпинделя (рисунок 6).

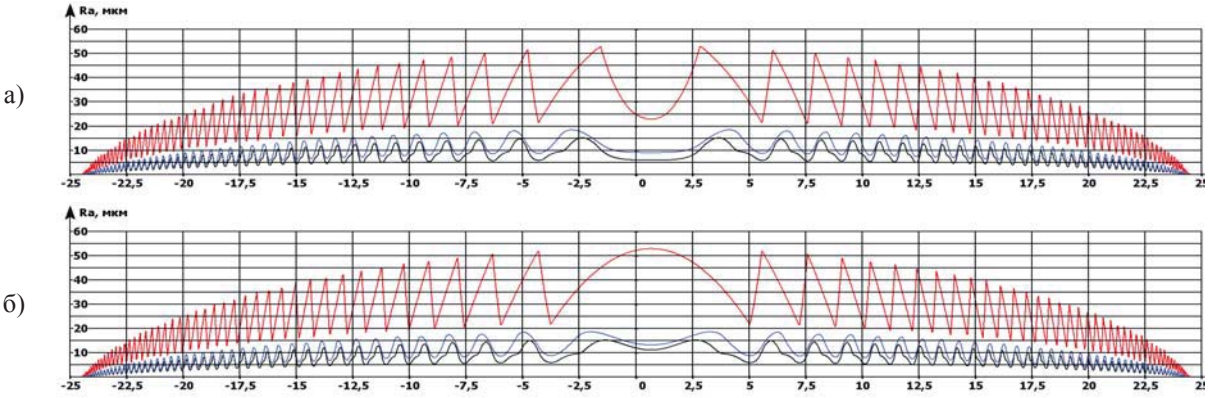


Рисунок 6 – Высотные параметры при n=400 об/мин для различных значений подач: а) S=1612 мм/мин; б) S=1619 мм/мин

График зависимости среднего арифметического отклонения профиля от минутной подачи для положения сечения при B=0 мм показывает, что на характер полученной зависимости оказывает влияние периодические совпадения траектории движения зубьев фрезы при «обратном» ходе с ранее образованными следами обработки, что отражено локальными максимумами высотных параметров (рисунок 7). Локальные минимумы соответствуют прохождению зубьями при «обратном» ходе по оставшимся гребням микронеровностей.

Наибольший практический интерес для технолога представляет зависимость максимального значения Ra от подачи на зуб, которая приведена на рисунке 8.

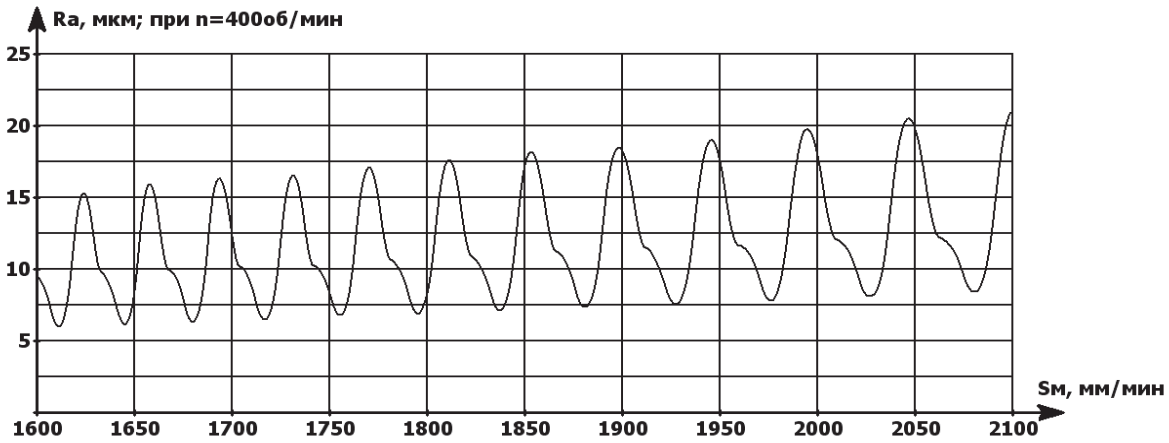


Рисунок 7 – Зависимость Ra в центральной области от величины минутной подачи

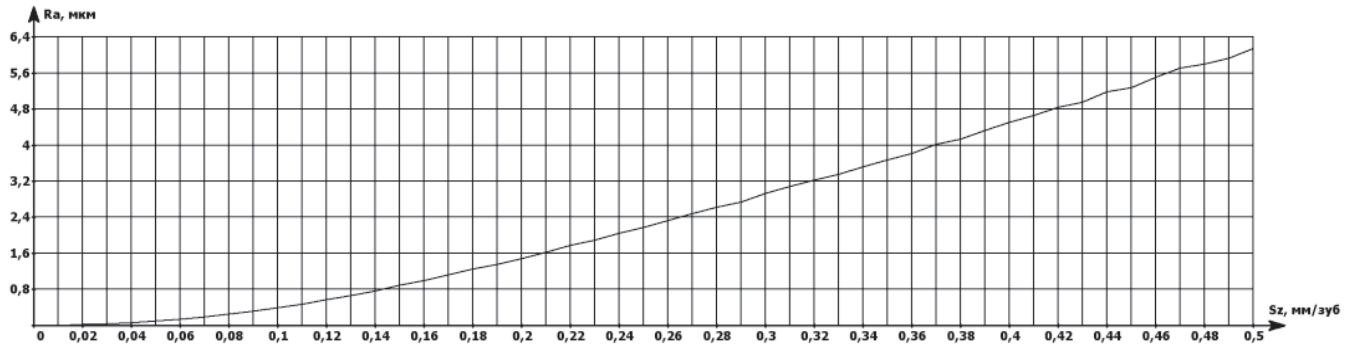


Рисунок 8 – Зависимость максимального Ra от величины подачи на зуб

Эта зависимость получается в результате математической обработки результатов многократных численных экспериментов, проведенных с помощью предложенной модели.

3. Методика экспериментального исследования

Для подтверждения возможности практического применения сделанных в ходе работы с имитационной моделью выводов был проведен ряд экспериментов при разных режимах резания инструментом различной конструкции. Эксперимент проводился на станке ГФ2171, оснащённом системой с ЧПУ FMS 3200, на котором было профрезеровано 24 образца из стали 45, глубина резания составляла 1 мм. Измерения шероховатости проводились на контактном профилографе-профилометре Hommel Tester W55.

Полученные данные были математически обработаны, в результате получены значения среднего арифметического отклонения профиля и относительной опорной длины. Анализ полученных результатов показал, что расхождения эсперементальных и рассчитанных по разработанной модели параметров шероховатости не превышают 10%, а среднее значение отклонений составляет около 5%. Таким образом, разработанная модель полноценно обеспечивает имитацию работы торцовых фрез.

4. Выводы

1. Анализ топограмм показывает, что для разных положений трасс профилографирования получаются значительно различающиеся значения параметров шероховатости.

2. Математическая модель с достаточной степенью точности обеспечивает расчет параметров шероховатости обработанной поверхности. Выявленные с помощью модели закономерности адекватно отражают процесс формирования топографии обработанной поверхности при торцовом фрезеровании, при наличии жесткости технологической системы.

3. Полученные в результате численных экспериментов зависимости геометрических параметров качества поверхности детали от входных параметров процесса обработки могут быть использованы при проектировании операций фрезерования деталей.

Список литературы

1. Стохастическое имитационное моделирование формирования геометрических параметров поверхности при торцовом фрезеровании / В.А. Хоменко, А.О. Черданцев // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012. – 1/1, С. 324-328.

2. Моделирование формирования геометрических параметров поверхности деталей при торцовом фрезеровании / В.А. Хоменко, А.О. Черданцев // 2-я международная научно-практическая конференция «Инновации в машиностроении»– Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2011. С. 237-240.

ANALYSES OF THE FACE MILLING PROCESS BASED ON THE IMITATION MODELLING

Khomenko V.A., D.Sc. (Engineering), Professor,
Cherdancev P.O., C.Sc. (Engineering), Associate Professor,
Cherdancev A.O., M.Sc. (Engineering), e-mail: hypertigr@mail.ru

Polzunov Altai State Technical University, 46, Lenin avenue, Barnaul, 656038, Russian Federation

Abstract: On the basis of the simulation of face milling process made analysis of dependence between the surface quality and the cutting conditions. It is noted that in the face milling process arises bulge form deviation. It is shown that the ratio of the feed rate and the spindle rotation frequency influence on the size of a roughness. The conclusions are confirmed experimentally.

Keywords: face milling, imitation simulation, topography, surface quality, cutting conditions.

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТОПОГРАФИЮ ПОВЕРХНОСТИ

А.М. ИКОННИКОВ, канд. техн. наук, доцент,
Р.В. ГРЕБЕНЬКОВ, магистрант,
В.С. СИЛИВАКИН, аспирант,
(*АлтГТУ, г.Барнаул, Россия*)

Иконников А.М. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова,
e-mail: iamagtu@mail.ru

Аннотация: Авторы проводят постановочные эксперименты с целью исследования влияния магнитно-абразивной обработки на топографию обрабатываемой плоской поверхности. При магнитно-абразивной обработке изделия значение итоговой шероховатости будет зависеть от ее величины перед обработкой, от времени обработки, и съем материала будет происходить по вершинам рисок. Была разработана экспериментальная установка. В ходе проведения эксперимента образец обрабатывался 4 раза по 30 секунд. После каждого этапа обработки производились замеры шероховатости на интерференционном микроскопе (оптическом профилометре). После проведения эксперимента были получены результаты, представленные в виде графика и в виде изображений-топографий.

Ключевые слова: Магнитно-абразивная обработка, шероховатость, длительность обработки, топография поверхности, съем материала.

1. Введение

Одной из проблем машиностроения является оценка влияния шероховатости, волнистости и отклонений от формы поверхностей деталей на их функциональные свойства.

Шероховатость (микрогеометрия) поверхности является одной из важнейших характеристик материалов и влияет на износостойкость, контактную жесткость, коррозионную стойкость и другие функциональные характеристики поверхности. Шероховатость поверхности детали образуется в направлении главного движения — движения резания вдоль обработочных рисок (продольная шероховатость) и в направлении поперечной подачи (поперечная шероховатость). Форма, размер и расположение неровностей зависят от метода обработки. Меняя метод обработки, можно изменять характер и расположение микронеровностей.

Оценка класса шероховатости поверхности детали производится измерением ее в направлении наибольшего значения, т. е. поперечной шероховатости, которая обычно в несколько раз превышает продольную шероховатость.

Очевидно, что при дальнейшей магнитно-абразивной обработке изделия значение итоговой шероховатости будет зависеть от ее величины перед обработкой, от времени обработки, и съем материала будет происходить с вершин рисок.

2. Методика экспериментального исследования

После предварительного строгания риски на подготовленной поверхности имеют следующий вид (рисунок 1).

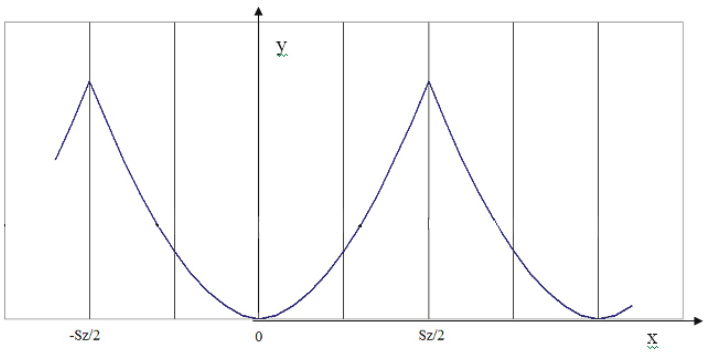


Рисунок 1 – Профиль рисок шероховатости после предварительного строгания

Так как профиль имеет периодический характер, параметры шероховатости поверхности фактически определяются участком $x \in [0; Sz/2]$.

В процессе обработки с поверхности заготовки снимается припуск. Предположим, что съем металла происходит с вершин рисок. При этом, в любой момент времени, они принимают представленную форму (рисунок 2).

Для подтверждения данной гипотезы был проведен эксперимент, в котором рассматривались изменение шероховатости стального образца после процесса магнитно-абразивной обработки и схема съема материала с течением времени. Габаритные размеры образца составляли 20x20x15 мм. Исходная шероховатость Ra принимала значение 11.91 мкм.

Была разработана экспериментальная установка. В шпинделе вертикально-фрезерного станка с ЧПУ 1 установлен цилиндрический магнитный индуктор 2, на столе станка 3 установлены тиски 4 с экспериментальным образцом 5.

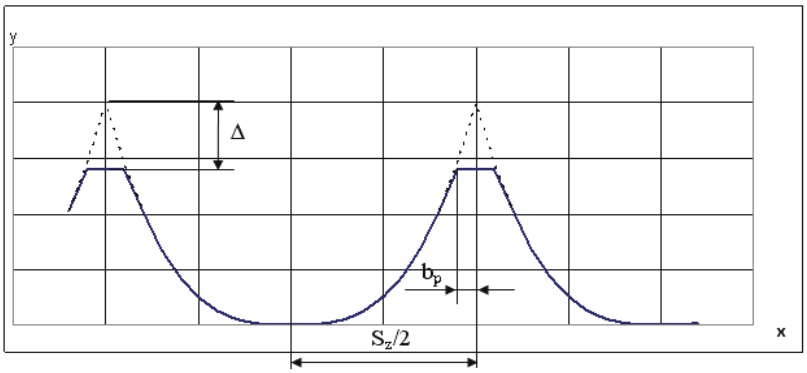


Рисунок 2 – Профиль рисок в процессе магнитно-абразивной обработки

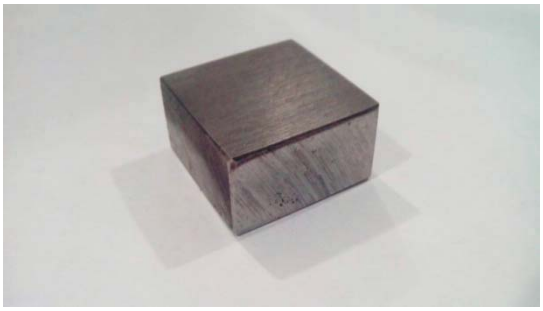


Рисунок 3 – Экспериментальный образец

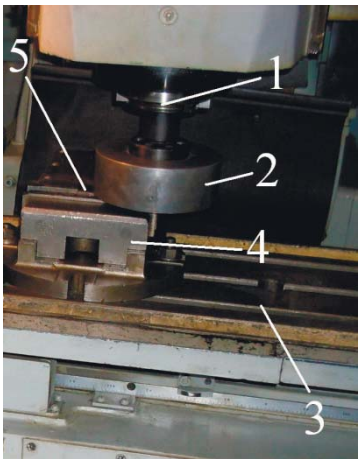


Рисунок 4 – Экспериментальная установка

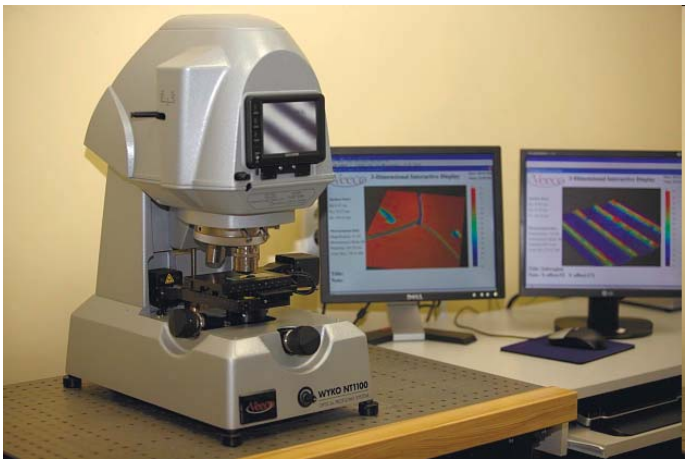


Рисунок 5 – Оптический профилометр

В ходе проведения эксперимента образец обрабатывался 4 раза по 30 секунд. После каждого этапа обработки производились замеры шероховатости на интерференционном микроскопе (оптическом профилометре). Магнитно-абразивная обработка проводилась магнитным порошком зернистостью 630/40 с частотой вращения шпинделя 200 об/мин и величиной рабочего зазора 1 мм.

3. Результаты и обсуждения

После проведения эксперимента были получены результаты, представленные в виде графика и в виде изображений-топографий, полученных при помощи оптического профилометра.

На графике представлено изменение шероховатости обработанной поверхности с течением времени (рисунок 6).

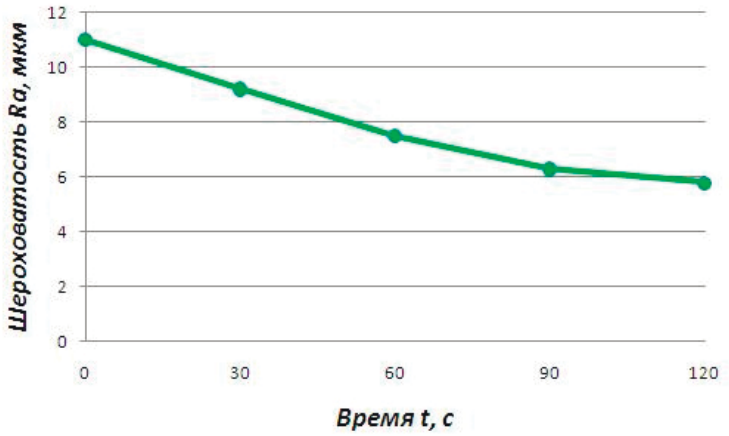


Рисунок 6 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от времени обработки

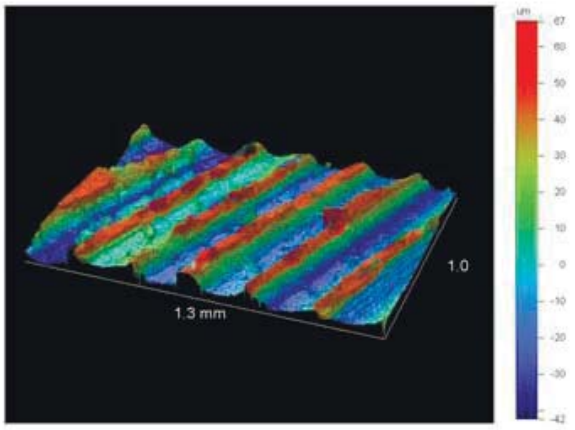


Рисунок 7 – Топография поверхности до обработки

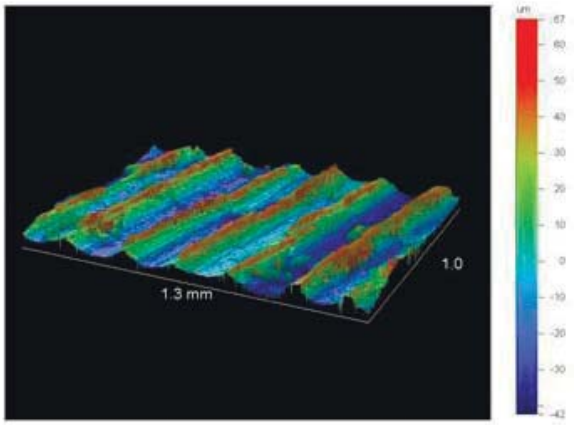


Рисунок 8– Топография поверхности спустя 30 секунд обработки

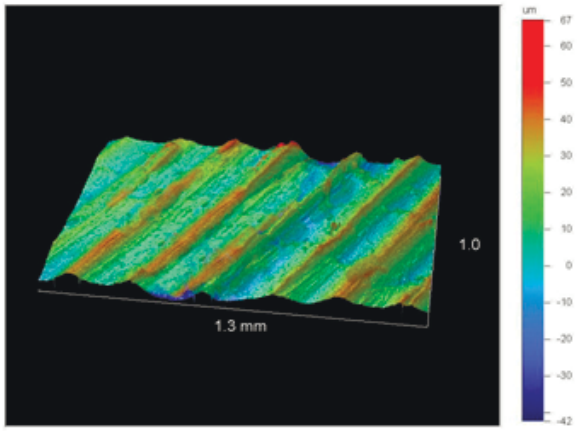


Рисунок 9– Топография поверхности спустя 60 секунд обработки

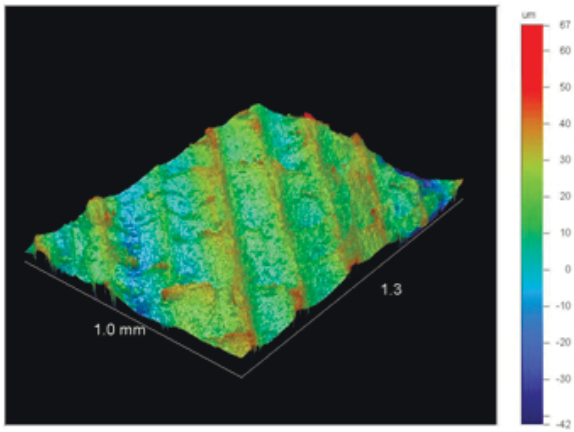


Рисунок 10– Топография поверхности спустя 90 секунд обработки

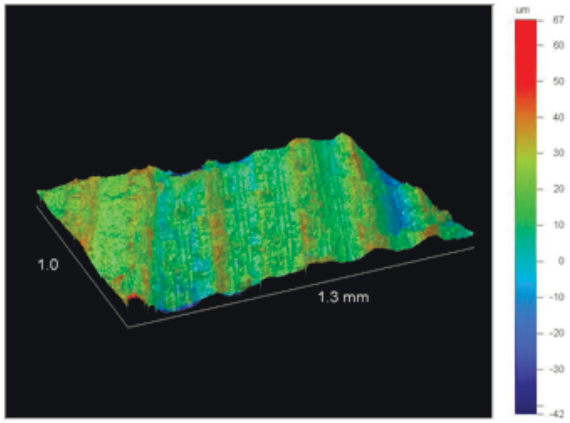


Рисунок 11– Топография поверхности спустя 120 секунд обработки

На полученных топографиях (рисунки 7-11) отчетливо видно уменьшение шероховатости поверхности обрабатываемого образца от прохода к проходу. Наблюдать это явление можно благодаря цветовой шкале, обозначающей различные высоты микронеровностей.

В процессе обработки происходит постепенный съем материала с вершин рисок шероховатости, что отчетливо видно уменьшением количества зон с красной окраской, и изменением их цвета на зеленый. Аналогично, изменяется цвет впадин между рисками с синего на зеленый.

4. Выводы

В результате проведенного эксперимента подтвердилось предположение о том, что в процессе магнитно-абразивной обработки съем материала с обрабатываемой поверхности происходит постепенно с вершин рисок исходной шероховатости.

Список литературы

1. *Барон, Ю.М.* Магнитно-абразивная обработка изделий и режущих инструментов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1986. – 176 с.

2. *Сакулевич, Ф.Ю.* Основы магнитно-абразивной обработки. – Мн. Наука и техника, 1981. – 328 с.

STUDY OF THE INFLUENCE OF MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING ON SURFACE TOPOGRAPHY

Ikonnikov A.M., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: iamagtu@mail.ru
Grebenkov R.V., M.Sc. (Engineering), e-mail: sigaset@yandex.ru
Silivakin V.S., A.Sc. (Engineering), e-mail: lg-kp@yandex.ru

Altai state technical university I.I. Polzunov, 46 Prospect Lenina, Barnaul, 656038, Russian Federation

Abstract: The authors conduct a staged experiments to study the influence of magnetic abrasive finishing on the topography of the machined flat surface. When the magnetic-abrasive processing of the product the total value of roughness will depend on its size prior to treatment, machining time and material removal will occur at the vertices of scratches. Was developed by the experimental setup. During the experiment, the sample was processed 4 times in 30 seconds. After each stage of processing were measured roughness at the interference microscope (optical profilometer). After the experiment, we obtained the results presented in the form of graphics and images-of topographies.

Keywords: magnetic-abrasive machining, roughness, duration of treatment, surface topography, material removal.

УДК 621.9

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТОЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ИНСТРУМЕНТАМИ, ОСНАЩЕННЫМИ СВЕРХТВЕРДЫМИ КОМПОЗИТАМИ

С.А. КЛИМЕНКО

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины
ул. Автозаводская, 2, г. Киев, 04074
atmu@ism.kiev.ua

Аннотация. Представлены направления совершенствования процессов механической обработки и примеры эффективного применения резцов, оснащенных поликристаллическими сверхтвердыми материалами на основе кубического нитрида бора и синтетического алмаза при точении деталей из труднообрабатываемых конструкционных материалов.

Ключевые слова: точение, поликристаллы, кубический нитрид бора, алмаз, режимы обработки, стойкость инструментов

Введение. Развитие технологий механообработки материалов – ключевая задача базовых отраслей промышленности. При этом применение инструментов, разработанных с использованием новейших материалов и современных представлений о процессе резания, рассматривается как приоритетное направление увеличения эффективности обработки и определяет экономичность производственных технологий.

Сегодня основными тенденциями развития процессов механической обработки представляются следующие: – высокоскоростная и высокопроизводительная обработка; – обработка без охлаждения или с минимальным применением СОТС; – применение инструментов с функциональными покрытиями и модифицированным поверхностным слоем; – обработка с высокими динамическими нагрузками; – уход от дискретных методов обработки и совмещение операций за счет кинематики процессов, геометрических параметров и особенностей конструкции инструментов; – многокоординатная обработка сложнопрофильных изделий, обработка инструментом с переменной режущей вершиной; – широкое использование управления процессами обработки, диагностика состояния режущего инструмента и состояния поверхностного слоя обработанных изделий на базе современного компьютеризированного оборудования.

В связи с этим актуальными задачами современной технологической науки, решение которых обусловливает соответствие создаваемых технологий мировым тенденциям, является развитие фундаментальных и прикладных исследований в области разработки и производства режущих инструментов которые обеспечивают высокоэффективную обработку деталей из самых современных конструкционных материалов.

Объем научных исследований по совершенствованию и развитию процессов обработки изделий из различных материалов инструментами со сверхтвердыми материалами (СТМ) во всем мире неуклонно возрастает. О большом внимании индустриально развитых стран к СТМ, как прогрессивным для оснащения инструментов, а в ряде случаев и конструкционным материалам, свидетельствует тот факт, что ведущие промышленно развитые страны используют около 80 % добываемых природных и производимых синтетических алмазов. При этом одной из основных областей применения является механообработка, в которой используется 70 % их общего объема.

Совершенствование технологий механической обработки с использованием инструментов, оснащенных СТМ нуждается в объединении материаловедческих представлений об эффективных структурах и оптимальных свойствах инструментальных и обрабатываемых материалов с развитием представлений о закономерностях обработки резанием. Основу такого подхода составляют современные знания о механике, теплофизике, кинетике, термодинамике и физико-химии контактного взаимодействия в зоне резания с учетом действия окружающей среды. Они базируются на положениях теории резания, высокотемпературного структурообразования, вычислительной термодинамики, представлениях о возможностях управления технологическими параметрами, диагностики in situ, анализе состояния поверхностного слоя обработанных изделий. К анализу целесообразно привлечь современные синергетические представления о сложных процессах в открытых системах.

Количественное описание текущего физико-химического и механического состояния ин-

струментального и обрабатываемого материалов в контактной зоне для конкретных условий процесса механической обработки, изучение эволюции и возможности трансформации поверхностей инструмента в контактной зоне под действием термобарических условий процесса резания, составляет фундаментальную основу совершенствования режущих инструментов и процессов механической обработки, используется в мотивации выбора или создания инструментальных материалов.

Результаты прикладных исследований. Технологии механической обработки – неотъемлемая часть промышленного производства, использование возможностей которой непрерывно расширяется. Знание основных закономерностей процессов, имеющих место в зоне обработки, с учетом принципов технологического обеспечения качества и технологической наследственности, позволяет использовать в деталях машин современные конструкционные материалы с высокими потенциальными свойствами, формировать в поверхностном слое деталей требуемое состояние, обеспечивая тем самым их эксплуатационные свойства. Для этого, прежде всего, нужно рассматривать проблему создания режущих инструментов и процессов механической обработки как актуальную задачу современного материаловедения.

Для лезвийной обработки деталей из материалов высокой твердости (закаленных сталей, чугунов, наплавленных и напыленных твердых покрытий) эффективно применение резцов, оснащенных поликристаллическими сверхтвердыми материалами (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (ПКНБ) [1–3]. Такая технология получила название – «твердое точение». В сравнении со шлифованием оно обеспечивает повышение производительности обработки в 3–4 раза, позволяет снизить энерго- и трудозатраты, расходы на оборудование и инструмент, повышает экологическую безопасность производства. Из ПСТМ на основе синтетического алмаза (ПКА) наиболее широкое применение нашли двухслойные композиты, которые используются при оснащении режущего инструмента для обработки цветных металлов и сплавов, изделий из керамических, древесностружечных, полимерных материалов, гранита и песчаника и др. [1, 2].

В ИСМ НАН Украины разработана гамма ПСТМ, организовано производство из них сменных многогранных неперетачиваемых пластин (СМНП) и инструментов с такими пластинами. СМНП из ПКНБ – киборит, борсинит, ПКА – АТП, АКП выпускаются по стандарту ISO 1832-85.

Обработка закаленных сталей. Режущие инструменты, оснащенные ПКНБ борсинит, эффективно обрабатывают, допуская удары, детали из закаленных сталей твердостью 60–63 HRC со скоростью резания до 2,5–3,0 м/с.

Режущие пластины SNMN 090306 и 120408 позволяют реализовать при обработке длинномерных деталей из закаленной стали ШХ15 технологию «бреющего точения», при которой обработка производится с подачами до 1 мм/об и обеспечивается получение поверхности с шероховатостью *Ra* 0,5–1,2. Использование квадратных СМНП обеспечивает 8 периодов стойкости по 40–90 мин, что позволяет выполнять обработку крупногабаритных изделий.

В сравнении с чистовым точением бочки прокатного валка из стали 9ХС (55–58 HRC) инструментом, оснащенным ПКНБ композит 10 или керамикой ВОК 71, разработанный инструмент и технология «бреющего точения» обеспечивает повышение производительности обработки в 3–9 раз.

Обработка высокомарганцовистой стали. Стали с высоким содержанием марганца характеризуются высокой степенью упрочнения под действием контактных нагрузок, что обуславливает их низкую обрабатываемость резанием. Для обработки деталей из литой стали 110Г13Л разработаны круглые пластины из ПКНБ киборит, которые позволяют эффективно обрабатывать различные поверхности как по корке, так и после ее удаления. При точении по корке со скоростями резания 1,2–1,7 м/с, подачами 0,3–0,4 мм/об и глубиной резания до 8–9 мм стойкость резца с ПКНБ составляет 120–180 мин. Обработка торцевой поверхности с неровностями от плазменной отрезки литников производится со скоростями резания 0,7–0,8 м/с, подачами 0,25–0,35 мм/об и глубиной резания до 6–7 мм. Стойкость инструмента составляет 60–90 мин.

Полная обработка брони конусной дробилки производится инструментом с круглой пластиной RNUN 190700T, используя всю длину ее режущих кромок (10–12 периодов стойкости), без СОТС и без введения в зону резания дополнительных видов энергии. Сравнение обработки брони твердосплавным инструментом и инструментом с ПКНБ, показывает, что в последнем случае в 5–7 раз повышается производительность обработки и в 2–3 раза увеличивается стойкость инструмента по сравнению с обработкой твердосплавными резцами, Производительность обработки приближает к производительности ПМО, при меньшем расходе энергии и лучших условия труда.

Обработка напыленных и наплавленных деталей. В условиях ремонтных цехов металлургических предприятиях опробированы технологии точения инструментами, оснащенными

ПКНБ, покрытий, полученных электродуговой наплавкой порошковыми проволоками ПП-Нп-35В9Х3СФ (46–52 HRC), ПП-Нп-25Х5ФМС (45–50 HRC), ПП-Нп-30Х4Г2М (52–58 HRC), спеченными лентами ЛС-70Х3НМ (54–56 HRC), ЛС-5Х4В3МФС (45–50 HRC), порошковой лентой ПЛ-АН 111 (48–55 HRC), плазменной наплавкой порошками ПГ-СР3 (47–52 HRC), ПГ-СР4 (54–58 HRC), ПГ-СР5 (60–62 HRC), печной наплавкой композиционным материалом релит-мельхиор. Выполняется как чистовая обработка, так и точение непосредственно по дефектной корке покрытия

Резцы с ПКНБ позволяют также успешно обрабатывать детали, восстановленные напылением с последующим оплавлением покрытий из порошков ПС-12НВК2-01 (65% ПГ-10Н-01 + 35% WC), ПГ-СР3, ПГ-СР4, ПГ-ХН80С4Р4, ПН85Ю15, напылением проволоками 65Г, 40Х13, напылением аморфно-кристаллическими композитами систем Fe-B, Fe-Cr-B, Fe-Si-B.

Обработка деталей из отбеленного чугуна. Прокатные, мельничные, каландровые и другие виды валков из отбеленного чугуна изготавливаются с твердостью бочек 2350–6200 МПа (37–85 HS). Для их обработки используются специальные вальцетокарные станки с ЧПУ, которые оснащаются резцами с механическим креплением круглых пластин из режущей керамики, работающими с режимами резания: v = 0,3–0,4 м/с; S = 0,12 мм/об; t = 0,3–0,5 мм. Стойкость резцов составляет 1–2 прохода по бочке валка.

Для точения валков в ИСМ НАН Украины разработаны режущие пластины (RB, C, РМН) из ПКНБ и оригинальная конструкция резца для их механического крепления. Черновые и чистовые проходы выполняются без переустановки СМНП. Сравнение результатов испытаний резцов с ПКНБ с керамическими резцами показало преимущество первых по производительности обработки в 4–5 раз и по стойкости в 2,9–3,4 раза.

Инструмент с СМНП из ПКНБ позволяет обрабатывать валки как по бочке, так и по ручьям с режимами резания: скорость резания – 1,2 м/с на черновых проходах и 1,4 м/с на чистовом проходе; подача – 0,2 мм/об; глубина резания – 1,5 мм на черновых проходах и 0,2 мм на чистовом. При работе с указанными режимами без переустановки режущей пластины полностью обрабатывается прокатный валок, т.е. период стойкости пластины составляет 125 минут. Инструментом, оснащенным одной круглой пластиной, обрабатывается по бочке и ручьям 2–3 валка.

Обработка деталей из твердого сплава. Инструмент, оснащенный ПКНБ борсинит, позволяет обрабатывать арматуру прокатных валков из твердых сплавов ВК25, ВК30. При работе со скоростями резания 0,2–0,3 м/с режущий инструмент до износа по задней поверхности 0,25 мм обрабатывает 3 детали по 120 мм с 5-ю ручьями в каждой.

Обработка деталей из титановых сплавов. Обработка титановых сплавов происходит при сравнительно высоких температурах в зоне резания, что обусловливается их низкой теплопроводностью и особенностями протекания процесса точения.

При обработке титанового сплава ВТ3-1 инструменты с АКП сохраняют свою работоспособность в широком диапазоне скоростей резания. При режимах резания v = 1,5 м/с; S = 0,11 мм/об; t = 0,1 мм стойкость инструмента ($h_з$ = 0,2 мм) составляет 55–60 минут.

Зависимость скорости изнашивания инструмента с круглой пластиной АКП (АСМ 60/40, ∅ 12,7 мм) от величины переднего и заднего углов при обработке титанового сплава ВТ14 носит экстремальный характер. Оптимальными являются геометрические параметры инструмента: $\gamma = -(3–5°)$; α = 8–12°. Инструмент, оснащенный АКП (v = 1,5–2,0 м/с; S = 0,05 мм/об; t = 0,15 мм), позволяет стабильно получать детали с шероховатостью обработанной поверхности Ra 0,46–0,52.

Скорость резания при фрезеровании титана является основным параметром, определяющим стойкость инструмента. Применение инструмента, оснащенного ПКНБ, позволяет производить обработку сплава ВТ22 со скоростями резания более 1,0 м/с. Стойкость такого инструмента составляет 100–120 мин. При этом стабильно формируется шероховатость обработанной поверхности Ra 0,2–0,4. Применение при фрезеровании титанового сплава концевой фрезой, оснащенной пластинкой из ПКНБ, СОТС «Трибол», повышает стойкость инструмента в 2,5–3,0 раза.

Обработка деталей из цветных металлов и сплавов. Одной из самых распространенных областей применения инструмента с ПКА является обработка алюминиево-кремниевых сплавов с содержанием 11–26 % Si. Применение при обработке поршней инструментов с ПКА позволяет в 100–300 раз повысить их стойкость по сравнению с твердосплавными резцами и увеличить производительность обработки. Шероховатость обработанной поверхности $Ra \le 0,8$ мкм достигается при износе инструмента $h_з \le$ 0,05–0,1 мм после точения 2000–7000 поршней, что соответствует 40–110 м^2 обработанной поверхности или 2500–9000 мин машинного времени.

Обработка деталей из неметаллических

материалов. Широкое использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) ограничивается в связи с большими затруднениями, возникающими при их механической обработке. ПКА, отличающиеся от других инструментальных материалов максимальной теплопроводностью и высокой стабильностью геометрических параметров режущей кромки, обеспечивают самую низкую температуру в зоне резания, наиболее высокие показатели качества обработанной поверхности изделий из ПКМ, стойкость инструмента и производительность обработки.

Необходимо учитывать, что существенно меньшие силы резания, чем при обработке металлов, позволяют использовать инструмент из ПКА при значительных по абсолютной величине подачах (до 1,2 мм/об) и глубинах резания (до 7–8 мм при размере пластины 12,7 мм, то есть до 0,5–0,6 длины режущей кромки). Стойкость инструмента из ПКА при обработке полимерных композиционных материалов достигает 300 мин.

Перспективной областью применения поликристаллического алмаза является обработка трудно поддающихся резанию и вызывающих быстрый износ инструмента таких материалов, как древесностружечные композиты средней плотности с высоким содержанием клея, с покрытиями на основе меламиновой смолы, декоративный бумажно-слоистый пластик, а также другие материалы, структурные составляющие которых обладают абразивным действием. Разрезка таких материалов производится при скорости резания 0,50–1,16 м/с, а инструмент из ПКА имеет стойкость в 200–300 раз превышающую стойкость твердосплавных инструментов.

Инструмент, оснащенный ПКА, перспективен для точения детонационных керамических покрытий на основе Al_2O_3 (Al_2O_3 (100 %) и Al_2O_3 (85 %) + Ti_2 (15 %)), твердостью 80–84 HRA. Анализ экспериментальных зависимостей скорости изнашивания инструментов, оснащенных АКП и АТП, от скорости резания при точении покрытия с Al_2O_3, показывает, что при скоростях резания до 0,9 м/с оба инструмента ведут себя аналогично. При скорости резания до 1,2 м/с более работоспособным является инструмент, оснащенный АКП.

Инструменты, оснащенные ПКА, показали высокую работоспособность при обработке деталей, изготовленных из силицированного графита. Высокая производительность обработки и стойкость инструмента обеспечиваются при режимах резания v = 0,8–1,0 м/с; S = 0,14–0,17 мм/об; t = 0,1–0,25 мм.

Детали из углеграфита обрабатываются алмазным инструментом со скоростью резания 3,3–5,0 м/с.

Заключение. Приведенные примеры показывают высокую эффективность и широкие возможности инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора и синтетического алмаза при точении деталей из широкой гаммы труднообрабатываемых материалов.

Список литературы.

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – М: Машиностроение, 2014. – 608 с.

2. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-и т. / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Т.5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 316 с.

3. Обработка резанием деталей с покрытиями / С.А. Клименко, В.В. Коломиец, М.Л. Хейфец и др. Под ред. С.А. Клименко. – К.: ИСМ НАН Украины, 2011. – 353 с.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF TURNING OF HARD-MACHINABLE MATERIAL PARTS BY TOOLS WITH SUPERHARD COMPOSITES

Klimenko S. A.
V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukraine, St. Avtozavodskaya, 2, Kyiv, 04074, atmu@ism.kiev.ua

Abstract. The directions of mechanical processing improvements and examples of effective application of tools, equipped with polycrystalline superhard materials based on cubic Boron Nitride and synthetic diamond when turning of parts made of hard-to-machine materials are presented.

Keywords: turning, polycrystalline, cubic Boron Nitride, diamond, processing modes, cutting tool life.

УДК 621.9.048.6.04

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А. Ю. МАРЧЕНКО, канд. техн.наук,
Н. Н. КУЗНЕЦОВА
Г. В. СЕРГА, доктор техн. наук, профессор

Серга Г.В. 350064, г. Краснодар, ул. Калинина 13, Кубанский государственный аграрный университет
e-mail: serga-georgy@ mail.ru

Аннотация: Вскрыто противоречие между способом технологического воздействия и способом осуществления технологического транспорта в существующих процессах упрочняющей обработки. Показана возможность устранения этого противоречия за счет применения принципиально нового технологического оборудования на базе релятивных винтовых барабанов. В предлагаемых конструкциях вибрационных машин вибровозбудители, как таковые, отсутствуют, необходимость в них отпала, поскольку движение частиц масс загрузки обеспечивают оригинальные конструкции релятивных винтовых барабанов, совершающих вращательное движение вокруг собственной оси. Для осуществления процесса упрочнения поверхности деталей геометрия релятивного винтового барабана и ее динамика должны быть своеобразны: форма, пространственная ориентация, воздействие сил, обеспечивающих обрабатываемым деталям одновременно вращательно-поступательное и колебательное движения. В результате этого, непрерывно движущиеся через внутреннюю полость релятивного винтового барабана обрабатываемы детали, осуществляют внутри релятивного винтового барабана поступательно-вращательное движение с наложенными колебаниями, в результате чего повышается производительность упрочняющей обработки деталей.

Ключевые слова: упрочнение поверхности детали, амплитуда движения, релятивный винтовой барабан.

1. Введение

В развитии технологических процессов и машин существует тенденция, определяемая взаимозависимостью их основных функций, транспортных и технологических движений. Транспортное движение – всего лишь перемещение предметов обработки – деталей машин, технологическое – это движение, которое производится с предметом, в данном случае – упрочнение поверхности деталей машин. В настоящее время в нашей стране создан новый класс рабочих органов машин, названных нами релятивными винтовыми барабанами. По классификации академика Л. Н. Кошкина, они относятся к машинам четвертого класса, и их предлагается использовать для упрочнения поверхности деталей машин [1].

2. Методика исследования

Эти машины (четвертого класса) соединяют относительно независимые, взаимосвязанные технологические операции – использование вибрационного поля с большой амплитудой колебаний и поточной формы организации производства. В основу таких машин могли бы быть положены шнековые устройства, обеспечивающие непрерывное транспортное движение масс загрузки. Однако, одно только транспортное движение со стационарным характером движения предмета обработки надлежащего эффекта не приносит.

При особом подходе к конструированию рабочих поверхностей шнека оказалось возможным совместить транспортные и технологические функции. Эта реализуется за счет оформления винтовых поверхностей шнека по его периметру плоскими элементами, разнонаправленными по отношению к винтовым линиям.

Изменяя технические характеристики – параметры, создающие в совокупности поверхность релятивного винтового барабана, оказалось возможным управлять сложно пространственным движением потоков предметов обработки (деталей) с большой амплитудой движения.

Например, на рисунке 1 представлен винтовой барабан, у которого дискретные плоские рабочие поверхности, в виде равносторонних треугольников, располагаются вдоль трех ломанных винтовых линий основного направления с шагом S_1: 2-3-4-5-6-7; 8-9-10-11-12; 13-14-15-16-17, и двух ломаных винтовых линий противоположного направления: 12-16-5-10-14-3-8; 17-6-11-15-4-9-13 с шагом S_2.

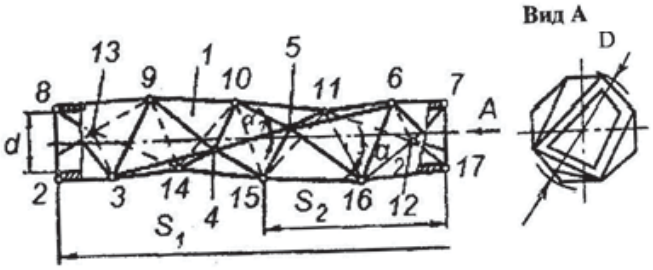
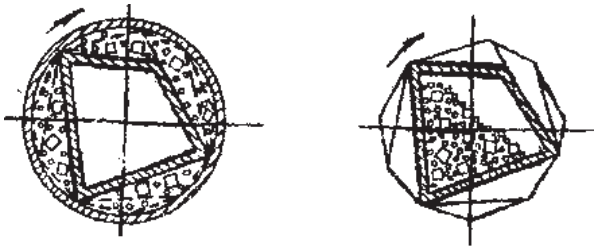


Рисунок 1 - Релятивный винтовой барабан с тремя ломанными винтовыми линиями основного направления и двумя ломанными линиями противоположного направления

3. Результаты обсуждения

Итак, релятивные винтовые барабаны, представляющие собой сложные пространственные конструкции, имеют сходство со шнековыми устройствами. Постараемся представить себе движение шара (в пределах материальной точки) при вращении релятивного винтового барабана, заключенного в цилиндрическую оболочку (рисунок 2а). Находясь в определенной точке плоской поверхности вращающегося релятивного винтового барабана, шар ею перемещается на соседнюю плоскую поверхность (эффект шнека) и в осевом направлении. Попав на соседнюю поверхность, имеющую противоположное направление, шар изменит направление осевого перемещения. Затем он снова попадет на эту поверхность, с которой началось движение, и т. д, т. е., в конечном итоге, результирующего осевого перемещения шар не получит.



а) б)

Рисунок 2 – Схема загрузки предметами обработки релятивного винтового барабана
а) в пространстве между стенками винтового барабана и внутренней поверхности цилиндра; б) внутри винтового барабана

Иное дело, когда шары (предметы обработки) находятся внутри релятивного винтового барабана. В этом случае, результирующая осевого перемещения всей массы загрузки (предметов обработки) обязательно будет иметь место и это определяется соотношением характеристик разнонаправленных винтовых поверхностей, которые и создают эффект усиления взаимодействия масс загрузки, т. е. способствуют интенсификации процесса упрочнения поверхности деталей (предметов) обработки. По сравнению с внешним расположением, здесь значительно выше интенсивность взаимодействия предметов обработки. Что же касается рассуждений о выявленном направлении осевого перемещения, то, в принципе, они остаются такими же. При внутреннем расположении предметов обработки, т. е., при отсутствии внешних ограничивающих устройств, в значительной мере действует эффект шнека.

На основании пояснений, изложенных выше, можно представить всю сложность происходящих явлений и характер движения внутри релятивного винтового барабана.

Так как вибрация – наиболее распространенный вид механического воздействия на предметы обстановки, обеспечивающий быстрое протекание технологических процессов, то одним из прогрессивных видов техники для упрочнения поверхности деталей методом поверхностно-пластического деформирования являются вибрационные станки (рисунок 3 и рисунок 4).

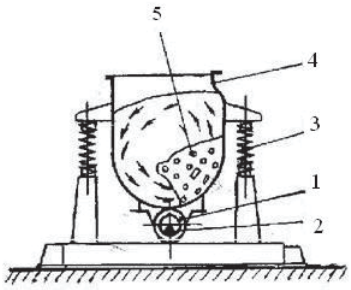


Рисунок 3 – Вибрационный станок для упрочняющей обработки методом поверхностно-пластического деформирования:1 – двигатель; 2 – вибровозбудитель; 3 – упругие связи; 4 – контейнер; 5 – предметы обработки

Такие станки обеспечивают высокую удельную производительность при относительно низких энергозатратах, имеют значительно меньшие габариты по сравнению с другими станками для упрочняющей обработки, в результате чего открывается принципиальная возможность сокращения производственных площадей, транспортных средств, капитальных и эксплуатационных затрат, т. е. создание ресурсосберегающих машинных технологий. Применение полезной вибрации позволило создать, на основе вибрационных процессов, целый ряд станков, которые обладают определенными преимуществами. Это, прежде всего, их конструктивная простота. Однако, при увеличении амплитуд колебаний происходит разрушение системы упругих связей и поэтому современные вибрационные станки работают в диапазоне амплитуд перемещений от 3 мм до 10 мм.

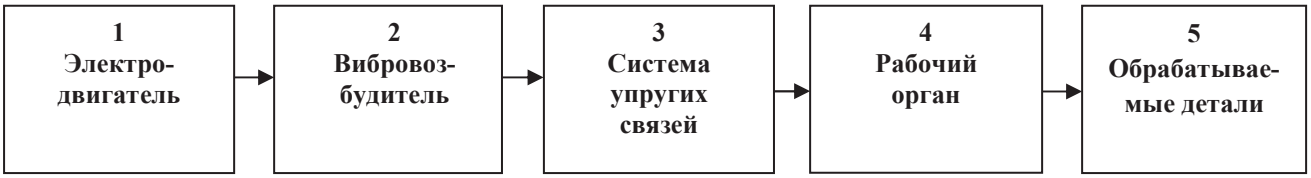


Рисунок 4 – Схема передачи движения от электродвигателя к предметам обработки в известных конструкциях станков для упрочняющей обработки

Можно предположить, что увеличение амплитуды колебаний позволит повысить интенсивность процессов обработки, однако, этот вопрос мало изучен и требует дальнейшей проработки.

Решение проблемы следует искать в нестандартных подходах, поиске оригинальных конструкций станков и технологий, обеспечивающих существенную интенсификацию процессов упрочняющей обработки, увеличении амплитуд и энергоемкости взаимодействия деталей не только друг с другом, но и со стенками рабочих органов без виброактиваторов.

Такая задача может быть решена с помощью станков, рабочими органами которых являются релятивные винтовые барабаны, обеспечивающие за счет оригинальной геометрии, не только нестандартные формы движения предметов обработки с большой амплитудой (10 – 1000 мм и более), но и значительную энергоемкость их взаимодействия.

В таких станках вращательное движение от электродвигателя 1 передается непосредственно рабочему органу станка–вращающемуся релятивному винтовому барабану 2 (рисунок 5 и рисунок 6), который, в свою очередь, сообщает движение предметам обработки с большой амплитудой движения навстречу друг к другу и к противоположным движущимся стенкам релятивного винтового барабана.

4. Выводы.

Технико-экономические преимущества от внедрения предлагаемых новых конструкций оборудования для упрочнения поверхностей деталей с рабочими органами в виде релятивных винтовых барабанов возникают за счет повышения производительности и надежности их работы, за счет бесперебойной подачи, дозировки и надежности поступления обрабатываемых деталей и их вывода за пределы станка.

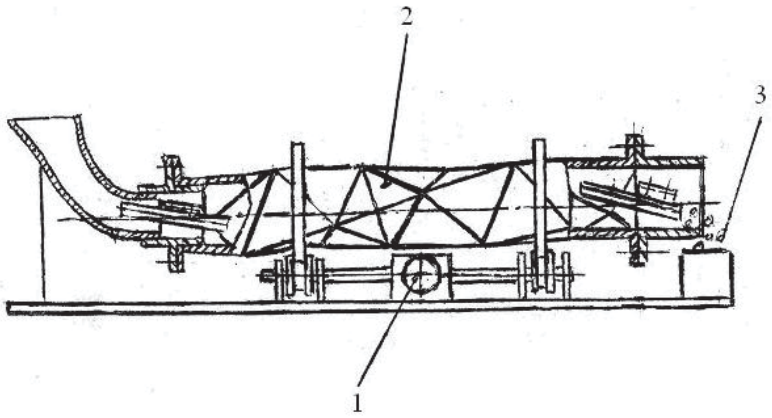


Рисунок 5 –Станок на базе релятивного винтового барабана для упрочняющей обработки деталей машин методом поверхностно-пластического деформирования: 1 – электродвигатель, 2 – релятивный винтовой барабан, 3 – предметы обработки

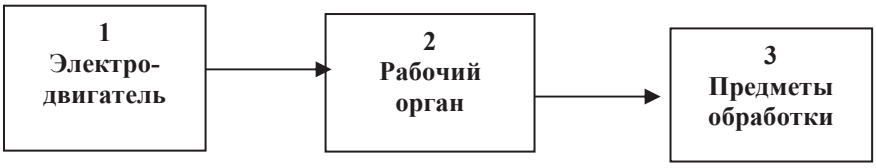


Рисунок 6 – Схема передачи движения от электродвигателя к предметам обработки станков для упрочнения поверхности деталей машин методом поверхностно-пластического деформирования

Список литературы

1. *Кошкин Л. Н.* Роторные и роторно-конвейерные линии / Л. Н. Кошкин − М.: машиностроение, 1986. − 319с.

2. Патент РФ №2549793 Станок для абразивной обработки деталей с отделением обработанных деталей от абразивных гранул и отходов обработки // Серга Г.В., Резниченко С.М. заявитель и патентообладатель КубГАУ, опубл. 27.042015. Бюл. № 12.

NEW DESIGNS OF THE EQUIPMENT FOR HARDENING OF SURFACES OF DETAILS IN MACHINE-BUILDING PRODUCTION

Marchenko A. Yu., of Cand.Tech.Sci.,
Kuznetsova N. N.,
Serga G. V., doctor техн. sciences, professor

Serga of G.V. 350064, Krasnodar, st. of Kalinin 13, Kuban state agricultural university, e-mail: serga-georgy @ mail.ru

Abstract: The contradiction between way of technological influence and way of implementation of technological transport in the existing processes of the strengthening processing is opened. Possibility of elimination of this contradiction due to use of essentially new processing equipment on the basis of relative screw drums is shown. In the offered designs of vibration cars vibroactivators as those, no, need for them disappeared as the movement of particles of lot of loading is provided by original designs of the relative screw drums making a rotary motion round own axis. For implementation of process of hardening of a surface of details the geometry of a relative screw drum and its dynamics have to be peculiar: a form, spatial orientation, influence of forces providing to the processed details at the same time rotary and forward and oscillatory movements. As a result of it, continuously moving through an internal cavity of a relative screw drum details are processed, carry out in a relative screw drum a forward rotary motion with the imposed fluctuations therefore productivity of the strengthening processing of details increases.

Keywords: hardening of a surface of a detail, movement amplitude, relative screw drum.

УДК 621.9.06:678.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.М. МАРКОВ, доктор техн. наук, профессор,
П.О. ЧЕРДАНЦЕВ, канд. техн. наук,
С.В. ГАЙСТ, магистр техники и технологии, аспирант,
С.А. КАТАЕВА, магистрант

Черданцев П.О. – 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
e-mail: p004092@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрены особенности механической обработки, в частности фрезерования, стеклопластиков, в силу которых использование традиционных конструкций фрез, применяющихся при обработке сталей и сплавов, не является рациональным. Отмечено, что в то же время создание единых рекомендаций по проектированию фрез для обработки стеклопластиков невозможно. Предложена методика экспериментального определения рациональных конструктивно-геометрических параметров фрез. Полученные результаты могут использоваться для проектирования операций фрезерования деталей из стеклопластика.

Ключевые слова: композиционные материалы, стеклопластики, фрезерование, конструктивно-геометрические параметры, режимы резания.

1. Введение

На сегодняшний день композиционные материалы широко используются практически во всех отраслях промышленности, так как обладают высокими прочностью, жёсткостью и другими физико-механическими свойствами, обеспечивающими высокие эксплуатационные характеристики готовых изделий.

К композиционным материалам относятся такие материалы, как стеклопластики, бороплластики, углепластики, текстолиты, органопластики. Из них наиболее распространёнными являются стеклопластики [1].

Типичный стеклопластик представляет собой сочетание матрицы и наполнителя. В качестве матрицы и наполнителя могут использоваться сильно различающиеся по своим свойствам материалы, оказывающие определяющее влияние на свойства конкретной марки стеклопластика. Не менее существенное влияние на свойства материала оказывает взаимное расположение армирующих волокон.

Разнообразные сочетания указанных характеристик (рисунок 1) обеспечивают значительный разброс физико-механических и, как следствие, эксплуатационных свойств этого класса материалов.

Изделия из стеклопластиков стремятся изготовить максимально приближенными к окончательной форме, однако полностью исключить механическую обработку не удаётся. В частности, во многих случаях возникает необходимость в обработке фрезерованием различных пазов, окон, плоскостей и уступов, являющихся либо исполнительными поверхностями, либо поверхностями, по которым осуществляется неразъёмное сопряжение деталей. При этом требования к точности обработки составляют 10 – 11 квалитеты, к качеству поверхности – Ra не более 10 мкм (а в ряде случаев– не более 2,5 мкм).

Однако следует отметить, что механическая обработка стеклопластиков имеет ряд специфических особенностей, основными из которых являются низкая теплопроводность материала, абразивность наполнителя, а так же упругие свойства материала.

Таким образом, при проектировании операций механической обработки стеклопластиков необходимо руководствоваться некими эмпирическими рекомендациями, учитывающими перечисленные особенности (обрабатываемость, склонность к возникновению тех или иных дефектов, образованию того или иного типа стружки) конкретной марки стеклопластика. На сегодняшний день единственным справочным источником (за исключением каких-то отдельных частных случаев) по назначению конструктивно-геометрических параметров режущего инструмента и режимов резания является отраслевой стандарт ОСТ 5.9569-74. Однако данный стандарт не учитывает большой объём существующих марок стеклопластика, который к тому же расширяется высокими темпами, параллельно с развитием соответствующих отраслей промышленности.

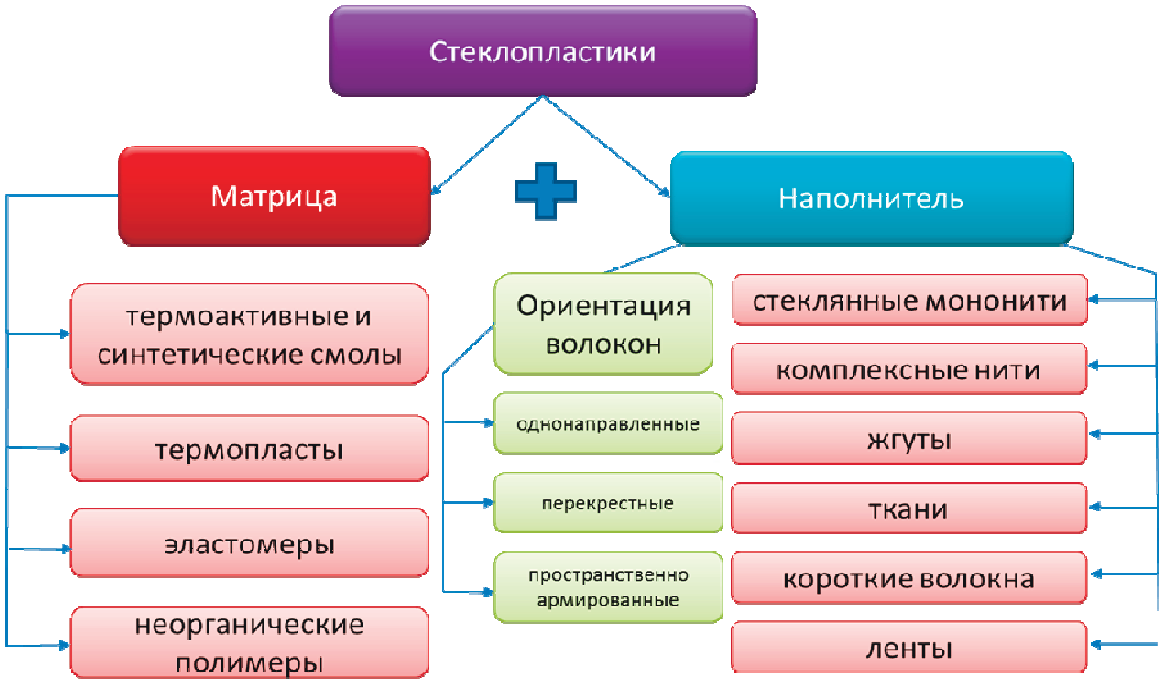


Рисунок 1 – Многообразие стеклопластиков

Кроме того, данные рекомендации не учитывают появившиеся за четыре десятилетия новые конструкции и материалы режущего инструмента, а также противоречивость некоторых предъявляемых к инструменту требований, обусловленных особенностями обработки стеклопластиков. Всё это приводит к неэффективности их механической обработки.

На сегодняшний день крупные производители режущего инструмента предлагают огромный выбор фрез по обработке композитного материала, но данные инструменты дают удовлетворительные результаты для одних марок стеклопластика и не обеспечивают необходимое качество обработки для других, несмотря на соблюдение рекомендаций производителя, или конструкции фрез разных производителей значительно отличаются друг от друга, поэтому технологу трудно сделать правильный выбор, опираясь на данные каталога. Если использовать универсальный инструмент (с алмазной крошкой), то себестоимость механической операции будет превышать все ожидаемые результаты.

Таким образом, исследования, направленные на разработку научно-обоснованной методики проектирования операции фрезерования, на основе управления технологическими параметрами процесса в соответствии с конструктивными особенностями применяемого инструмента и физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, обеспечивающей требуемые параметры качества обработанной поверхности при повышении производительности обработки, являются актуальными на сегодняшний день.

2. Методика экспериментального исследования

С целью определения вида зависимостей технологических параметров (шероховатости Ra, периода стойкости инструмента T, износа по задней поверхности h) от режимов резания (скорости резанияV, подачи S, глубины резания t) была предложена методика проведения исследований, апробированная на примере обработки труб из стеклопластика марки КППН (с косослойной продольно-поперечной намоткой волокон), обладающего следующими физико-механическими свойствами:

– предел прочности в тангенциальном направлении 460 МПа;

– предел прочности в осевом направлении 880 МПа;

– модуль упругости при растяжении 263 МПа;

– плотность $1{,}97 \times 10^3$ кг·м^3.

Эксперимент проводился на станке ГФ2171, оснащённом системой ЧПУ FMS-3200. В качестве режущего инструмента выбраны:

– цельная концевая фреза диаметром 10 мм из твёрдого сплава марки ВК8, имеющая 3 зуба, со следующими конструктивно-геометрическими параметрами: передний угол $\gamma = 10°$, задний угол $\alpha = 15°$, угол подъёма винтовой канавки $\omega = 10°$;

– сборная концевая фреза со сменными многогранными пластинами CNMA-090304 из твёрдого сплава марки ВК8, имеющая 3 зуба, со следующими конструктивно-геометрическими параметрами: передний угол $\gamma = -7°$, задний угол $\alpha = 7°$, угол подъёма винтовой канавки $\omega = 0°$.

Конструктивно-геометрические параметры обеих фрез входят в диапазон рекомендуемых [1] для обработки стеклопластиков.

Экспериментальная установка, используемая для проведения исследований, представлена на рисунке 2.

Предварительный литературный обзор показал, что целесообразно назначить следующие режимы резания из диапазонов, приводимых в [1]: скорость резания V = 63 м/мин; подача S = 0,02 мм/зуб; глубина фрезерования t =10 мм.

Контроль износа инструмента по задней поверхности зубьев осуществлялся с помощью прибора на основе микроскопа БМИ, цена деления которого составляет 0,05 мм. За критерий износа была принята величина 0,3 мм согласно рекомендациям ОСТ 5.9569-74. Период между измерениями износа инструмента варьировался от 3 до 15 минут. Контроль шероховатости обработанной поверхности осуществлялся с помощью профилографа HOMMEL TESTER W55.

3. Результаты и обсуждение

В результате обработки полученных экспериментальных данных получены степенные зависимости износа режущего инструмента от времени, а так же шероховатости обработанной поверхности от времени работы, представленные на рисунке 3.



Рисунок 2 – Экспериментальная установка, режущий инструмент

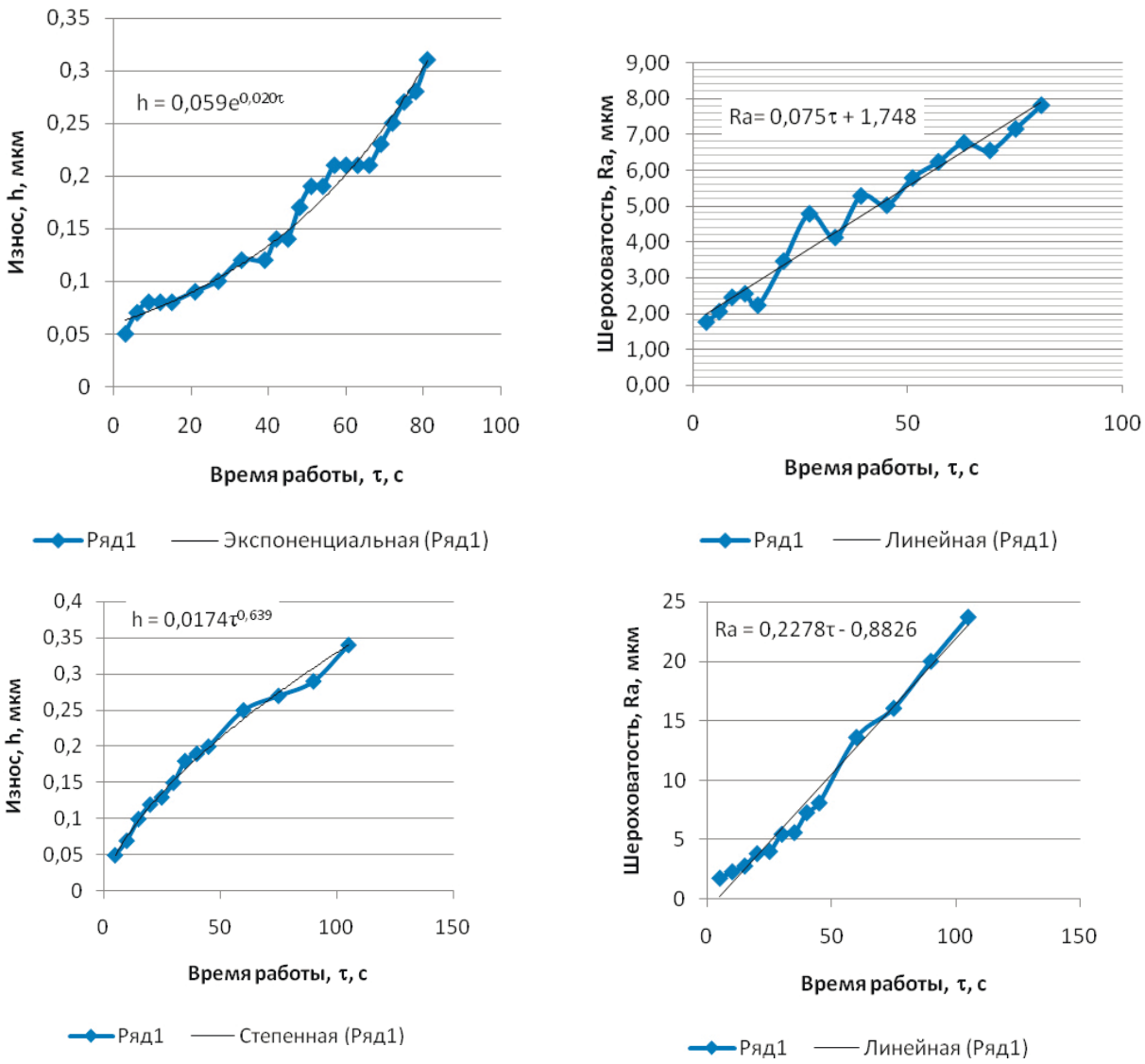


Рисунок 3 – Результаты исследований: зависимости Ra(τ) и h(τ)
(верхний ряд – цельная фреза, нижний ряд – сборная фреза)

Результаты показали, что, несмотря на соблюдение рекомендаций, и стойкость фрез, и качество обработанной поверхности значительно отличаются при использовании фрез с различными конструктивно-геометрическими параметрами. Таким образом, было подтверждено предположение о противоречивости существующих рекомендаций. Для решения задачи проектирования операции фрезерования стеклопластика необходимо установление зависимостей технологических параметров (Ra, T, h) не только от режимов резания (V, S, t), но и от конструктивно-геометрических параметров режущего инструмента (α, γ, ω,), а также от стоимости инструмента (C).

Однако изготовление опытных экземпляров фрез для подбора рациональных конструктивно-геометрических параметров для каждой определённой марки стеклопластика связано со значительными накладными расходами.

Поэтому были проведены дополнительные литературный анализ и патентный поиск, на основании результатов которых предложена следующая фреза, предназначенная для проведения экспериментов по одновременной оптимизации конструктивно-геометрических параметров и режимов резания.

Предлагаемая фреза (рисунок 4) представляет собой цельный цилиндрический корпус 1 диаметром 50мм из стали 40Х со специальными прямоугольными пазами определённой глубины, расположенными в шахматном порядке. В паз вставляется твёрдосплавная пластинка 2, которая ориентируется под определённым углом ω парой клиньев 3, после чего клинья фиксируются винтами 4. Меняя геометрию вставных клиньев и твёрдосплавной пластинки можно варьировать углы ω, α, γ. Кроме того, можно изменять число зубьев z.

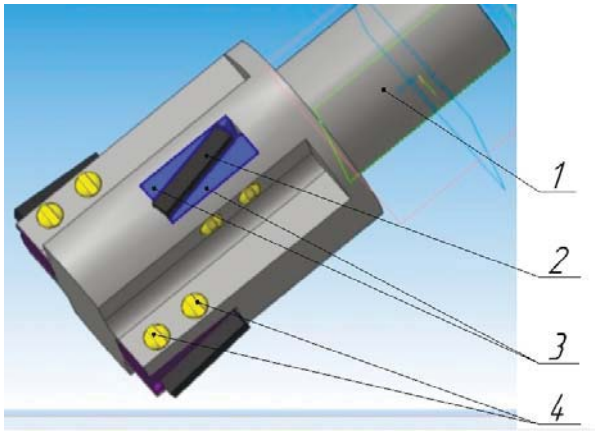


Рисунок 4 – Фреза с варьируемыми конструктивно-геометрическими параметрами

4. Выводы

1. Приводимые в литературе рекомендации по назначению режимов резания для фрезерования композитных материалов противоречивы и не позволяют обеспечивать требуемые показатели качества обработанной поверхности.

2. Полученные экспериментальные зависимости износа инструмента и шероховатости обработанной поверхности от времени обработки могут быть использованы при проектировании операций фрезерования деталей из стеклопластика марки КППН.

3. Предложенная конструкция фрезы позволит моделировать фрезы с различными геометрическими параметрами и исследовать их влияние на выходные параметры фрезерования.

4. Для каждого типа композиционного материала требуется проведение отдельных исследований по установлению зависимостей между выходными показателями процесса обработки и конструктивно-геометрическими и режимными параметрами операции фрезерования. Для таких исследований целесообразно применять автоматизированные системы на основе современных методик прогнозирования, например, с использованием искусственных нейронных сетей.

Список литературы

1. *Баранчиков В.И.,* Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Библиотека технолога // Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с., ил.

2. *Марков А.М.* Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов / Наукоемкие технологии в машиностроении, 2014 г., № 7. – С. 3-8.

3. Методика исследования износа инструмента на операциях фрезерования стеклопластиков // Марков А.М., Черданцев П.О., Гайст С.В., Барсукова О.А. // Актуальные проблемы в машиностроении: материалы первоймеждународной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Скибы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. –588 с. – С. 193-197.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF COMPOSITE MATERIALS MILLING

Markov A.M., D.Sc. (Engineering), Professor,
Cherdancev P.O., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: p004092@yandex.ru
Gayst S.V., M.Sc. (Engineering), graduate student,
Kataeva S.A., master student.

Polzunov Altai State Technical University, 46, Lenin avenue, Barnaul, 656038, Russian Federation

Abstract: The authors disclosed features of the machining, in particular of the milling, of fiberglass. This features is the reasons, why the use of usual construction of end mills, adapted for the machining of steels and any alloys, is not rational for machining of fiberglass. At the same time the authors noted that the creation of a unified recommendations for the design of end mills for machining of fibreglasses is impossible. The authors proposed a method for experimental determination of rational constructive-geometrical parameters of the mills for machining of fibreglasses. The derived results can be used for designing technology operations of milling of parts made of fiberglass.

Keywords: composite materials, fibreglasses, milling, constructive-geometrical parameters, cutting conditions.

УДК 621.914:51-74

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ОПЕРАЦИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ

М.И. МАРКОВА[1], *канд. техн. наук, доцент*,
А.М. МАРКОВ[1], *доктор техн. наук, профессор*
Н. СЧИГЁЛ[2], *доктор техн. наук, профессор*
([1]*АлтГТУ, г. Барнаул, Россия,* [2]*Политехника Ченстоховска, Польша*)

Марков А. М. – 656057, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
ФГБУ ВПО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»
e-mail: andmarkov@inbox.ru

Аннотация: Представлена модель оптимизации операции концевого фрезерования деталей формообразующей оснастки на станках с ЧПУ. Введен критерий оптимизации и система ограничений: по затратам на механическую обработку, на качество получаемых поверхностей, по технологическим возможностям оборудования, по прочности инструмента. В ходе экспериментальных исследований определено, что для операций чернового фрезерования применение предложенной модели позволяет уменьшить объем неудаленного материала на 28 %, по сравнению с нормативными режимами. Трудоемкость последующей операции (чистовое фрезерование) сокращается на 26 %. При этом общее оперативное время на две операции снизилось на 10 %. Кроме того, для чистового фрезерования значительно сокращается время проектирования траектории инструмента. Это позволяет сделать вывод о возможности использования модели в составе системы автоматизированного проектирования технологических операций фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ

Ключевые слова

Концевое фрезерование, модель оптимизации, система ограничений, пространственно-сложные поверхности, нормативы режимов резания, трудоемкость механической обработки

Введение

Возрастающие требования к расширению номенклатуры продукции машиностроения предопределяет необходимость постоянного совершенствования формообразующей оснастки [1,2]. Технические требования, предъявляемые к штампам и пресс-формам, достаточно жесткие: точность размеров 8-11 квалитеты, точность формы базовых плоскостей до 0.01/100 мм, шероховатость исполнительных поверхностей Ra<0.63 мкм. Следствием этого является высокая трудоемкость данной оснастки, достигающая сотен нормо-часов.

Это объясняются наличием в технологических процессах (ТП) таких отделочно-чистовых операций как шабрение, полирование, доводка, выполняемых, как правило, вручную. Необходимость их введения определяется тем, что предыдущие операции ТП (объемное фрезерование) не всегда могут обеспечить заданных чертежом требований.

В качестве основного технологического оборудования для изготовления деталей, содержащих пространственно-сложные поверхности, используются многоцелевые и фрезерные станки с ЧПУ, производительность которых значительно снижена по сравнению с нормативной. При этом производительность черновой обработки в основном лимитируется прочностью инструмента. Подачи чистового фрезерования занижены из-за нестабильности процесса резания [3,4,5]. Занижение режимов резания неизбежно связано с возрастанием затрат времени и средств, снижением конкурентоспособности изготавливаемой продукции.

Методика параметрической оптимизации

В данном работе под параметрической оптимизацией процесса формообразования пространственно-сложной поверхности понимается определение режимов резания V и S_Z, удовлетворяющих системе ограничений и доставляющих минимум критерию оптимальности. Постановка задачи оптимизации имеет вид:

- критерий оптимальности:

$$C = \frac{L_\Sigma(1+k_{\%})\pi d C_{1c-м}}{1000 t B S_z z V} \to \min \qquad (1)$$

- системы ограничений:

1) экономические ограничения представлены системой:

$$\begin{cases} \dfrac{L_\Sigma(1+k_{\%})\pi d C_{1c-м}}{1000tBS_z zV} \le [C] & (2) \\ \dfrac{1000tBS_z zV}{(1+k_{\%})\pi d} \ge [Пр] & (3) \\ \dfrac{0.005kdtL_\Sigma}{S_z} \le [V_{нм}] & (4) \\ \left(1+\dfrac{C_u}{B}\right)\dfrac{BИ_o L_\Sigma}{10^6 S_z z} \le [И] & (5) \end{cases}$$

2) ограничение по качеству пространственно-сложной поверхности:

$$S_z \le 2d\sqrt{\frac{8Hdr_{кр}}{2r_{кр}-d}} \quad (6)$$

3) технологические ограничения:

$$\begin{cases} S_{\min} \le S_z \le S_{\max} & (7) \\ n_{\min} \le \dfrac{1000V}{\pi d} \le n_{\max} & (8) \\ \dfrac{tBS_z q_N}{1000} \le \eta N_{ст} & (9) \end{cases}$$

4) ограничения по прочности фрезы:

$$\begin{cases} S_z \le C_{1s}\left(\dfrac{[\Delta]d_{экв}^4}{Bz(4L_{фр}+B)(2L_{фр}+B)^2}\right)^{a1}\left(\dfrac{d}{t}\right)^{a} & (10) \\ S_z \le C_{2s}\left(\dfrac{[\sigma]d_{экв}^3}{Bz\sqrt{4C_{3s}L_{фр}^2+d^2}}\right)^{a3}\left(\dfrac{d}{t}\right)^{a4} & (11) \end{cases}$$

В приведенных выражениях для критерия оптимальности (1) и ограничений (2– 11) приняты следующие обозначения: С – себестоимость операции, руб.; L_Σ - суммарной длины пути пройденного фрезой за время обработки, мм; k% - процентный коэффициент, учитывающий долю вспомогательного времени в основном; d – диаметр фрезы, мм; $C_{1С-М}$ - стоимость одной минуты работы станка, руб/мин; t, B - глубины и ширина фрезерования, мм; S_z – подача на зуб, мм; z – число зубьев; V – скорость резания, м/мин; Пр – производительность обработки; $V_{нм}$ – объем неудаленного материала, мм^3; $И_o$, $C_и$ – относительный износ инструмента для данной схемы фрезерного перехода и коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала; H – высота остаточных гребешков шероховатости, мкм; $r_{кр}$ - радиус кривизны обработанной поверхности, мм; q_N – величина удельного объема срезаемого материала, кВт/мм^3; $N_{ст}$, η – мощность (кВт) и КПД главного привода станка; [Δ]- величина допустимых упругих деформаций фрезы, мкм; $d_{экв}$, $L_{фр}$ – эквивалентный диаметр и длина режущей части фрезы; C_{1s}, a_1, a_2,– коэффициенты и показатели степени, позволяющие учитывать влияние различных факторов технологической операции, в том числе схемы фрезерного перехода; [σ] - допускаемого напряжения в наиболее опасной точке сердцевины фрезы, Мпа; C_{2s}, C_{3s}, a_3, a_4 – коэффициенты и показатели степени, позволяющие учитывать влияние различных факторов технологической операции, например, схему фрезерного перехода.

Методика экспериментального исследования

Для оценки эффективности предложенной модели оптимизации параметров технологических решений произведена обработка партии деталей. Образцы выполнены из стали Х12М (ГОСТ 5950-73), твердость 1700...1790 МПа, Заготовка – параллелепипед, размером 70×55×5мм.

В качестве инструмента выбрана фреза концевая по ГОСТ 17025-71 (диаметр - 10 мм; длина - 72 мм; длина режущей части - 22 мм; число зубьев – 4; угол наклона винтовой спирали -35^0; материал режущей части быстрорежущая сталь Р6М5 ГОСТ 19265-73*).

Перед обработкой были рассчитаны (выбраны) следующие параметры: количество стадий обработки; схемы фрезерного перехода для каждой стадии; значения режимов резания для каждого перехода. Обработка производилась в две стадии: черновой и чистовой переходы. Для чернового фрезерования была назначена двухстрочечная схема фрезерного перехода с обходом границ вдоль контура. Чистовое фрезерование осуществлялось по контурной схеме.

Оптимизированные значения режимов резания, полученные методом линейного программирования, приведены в таблице 1. Для сравнения производилась обработка такой же партии деталей на режимах и по рекомендациям общемашиностроительных нормативов [6], в соответствие с которыми выбрано также две стадии обработки: черновой и чистовой переходы. Черновая обработка осуществлялась по двухстрочечной схеме фрезерного перехода без обхода границ. Чистовое фрезерование производилось по контурной схеме.

В процессе экспериментов контролировали следующие параметры:

а) черновое фрезерование: оперативное время, объем неудаленного материала;

б) чистовое фрезерование: оперативное время; шероховатость обработанной поверхности.

Значение оперативного времени, то есть совокупность основного и неперекрываемого им вспомогательного, измерялось хронометрированием. Объем неудаленного материала после чернового фрезерования рассчитывался через фактическую массу детали после обработки и плотность материала, как процентная величина от теоретического объема, определяемого по чертежу. Величина объема неудаленного материала при чистовом фрезеровании не определялась, так как для контурной обработки его значение практически равно нулю.

Шероховатость обработанных поверхностей определялась на профилографе.

Таблица 1 - Режимы резания в экспериментах по оценке адекватности методики оптимизации

Переход		t, мм	S_z, мм/зуб	V, м/мин	Методика расчета
Вид	Схема				
Черновое фрезерование	Двухстрочечная без обхода границ вдоль контура	10 (первый проход); 7,5 (последующие)	0,05	40,5	Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания [6]
	Двухстрочечная с обходом границ вдоль контура	10 (первый проход); 6,8 (последующие)	0,04	42	Модель оптимизации (зависимости (1-11)
Чистовое фрезерование	Контурная	1	0,045	27	Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания [6]
		0,8	0,05	29	Модель оптимизации (зависимости (1-11)

Результаты и обсуждение

Эксперименты показали, что для операций чернового фрезерования предложенная методика позволяет уменьшить объем неудаленного материала на 28 %, по сравнению с нормативными режимами. При этом на 6 % возрастает оперативное время. Однако трудоемкость последующей операции (чистовое фрезерование) сократилось на 26 %. При этом общее оперативное время на две операции снизилось на 10 %. Кроме того, для чистового фрезерования значительно сократилось время проектирования траектории инструмента: данная процедура выполняется автоматически.

Выводы

1. Пространственно-сложные поверхности, обработанные на режимах, рассчитанных на основе существующих общемашиностроительных нормативов [134], имеют "завышенные" показатели качества (в частности, по оперативному времени черновых операций, по шероховатости чистовых операций) по сравнению с исходными требованиями. Это дает возможность повысить производительность обработки и вызывает необходимость произвести корректирование существующих нормативов.
2. Экспериментальная оценка методики оптимизации параметров технологических решений, направленных на обеспечение заданных показателей точности доказала возможность сокращения трудоемкости операций чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей на 26 %. При этом общее оперативное время на черновое и чистовое фрезерование снизилось на 10 %. Кроме того, для чистовой операции данная методика значительно сокращает трудоемкость проектирования управляющей программы, так как эта процедура выполняется автоматически.
3. Полученные на основе методики оптимизации операции фрезерования режимы обработки могут быть рекомендованы к практическому использованию.

Список литературы

1. *Иванов И.С.* Расчет и проектирование технологической оснастки в машиностроении: Учебное пособие. М.: Инфра-М, 2015. - 198 с.

2. *Махалин А.А.* Контроль качества изготовления пресс-форм для литья пластмасс под давлением // Наука, техника и образование. 2014. №3 (3). http://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-kachestva-izgotovleniya-press-form-dlya-litya-plastmass-pod-davleniem

3. *Некрасов Н.С.,* Логинов Н.Ю., Зотов А.В., Кузьмич И.В. Выбор оптимальной конструкции концевой фрезы при черновой обработке пресс-формы // Технические науки – от теории к практике . 2014. №35. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/vybor-optimalnoy-konstruktsii-kontsevoy-frezy-pri-chernovoy-obrabotke-press-formy.

4. *А.А.Казимиров, С.С. Кугаевский, О.М. Огородникова.* Конечно - элементный анализ концевых фрез для учета упругих отжатий при выборе режимов резания в точном приборо – и машиностроении. Вестник ЮУрГУ, № 12, 2012. С. 148-151

5. *Грубый С. В., Зайцев А. М.* Обоснование условий фрезерования карманов в корпусных деталях из алюминиевых сплавов / Наука и образование. Электронное издание. МГТУ им. Н.Баумана
http://technomag.bmstu.ru/doc/709770.html

6. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Ч.2.-М.:Экономика, 1990.-477 с.

OPTIMIZATION MODEL OF MILLING OF SURFACES OF FORM-BUILDING EQUIPMENT

Markov A.M. [1] D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru
Markova M.I. [1], C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: margarita-markova@inbox.ru
Sczygiol N. D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: norbert.sczygiol@icis.pcz.pl

[1] Polzunov Altai State Technical, 46 street Lenin, Barnaul, 656038, Russian Federation
[2] Czestochova University of Technology, 21, Al.Armii Krajowej,42-201 Czestonchowa,Poland

Abstract: The article deals with the optimization model of operation end milling spatially complex surfaces parts forming equipment on CNC machine. Introduced optimization criterion and the system of constraints: for the cost of machining, on the quality of the surfaces of manufacturing capabilities, on the strength of the tool. During the experiment it was found out that usage of the proposed model can reduce the amount of non-deleted material by 28%, the complexity of the subsequent operation – by 26%. Therefore the total time for two operations has also decreased by 10%. In addition, the time for tool path designing has significantly reduced for fine milling. This allows using model as a part of computer-aided design technology for milling operations of spatially complex surfaces on CNC machines.

Keywords: End milling, optimization model, system of constraints, spatially complex surfaces, standards of cutting conditions, the complexity of machining

УДК 621.91.002

ОЦЕНКА ПРИЕМЛЕМОСТИ ТЕХПРОЦЕССОВ МЕХОБРАБОТКИ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ ДЕТАЛЕЙ

О.А. МЕДВЕДЕВ – канд. техн. наук, доцент,
В.Ф. ГРИГОРЬЕВ - канд. техн. наук, доцент
(БрГТУ, г. Брест, Беларусь)

Медведев О.А. - 224017, г. Брест, ул. Московская, 267,
Брестский государственный технический университет,
e-mail: tm@bstu.by

Аннотация: С целью совершенствования методики оценки приемлемости техпроцессов выявлен ряд особенностей составления графов и уравнений угловых размерных связей, а также особенности решения таких уравнений. Графы и уравнения угловых размерных связей следует составлять и решать раньше графов и уравнений линейных размерных связей. Полную информацию о таких связях содержат исходные и технологические графы для трех координатных плоскостей детали. При выявлении технологических угловых размеров необходимо учитывать технологические базы, ориентирующие заготовки в угловых координатных направлениях. Дан пример применения методики, позволяющей повысить качество технологической подготовки производства.

Ключевые слова: Техпроцесс мехобработки, точность угловых размеров детали, технологическая система, графы угловых размерных связей, уравнения размерных связей.

1. Введение. Оценка приемлемости технологии мехобработки для обеспечения заданной точности размеров детали выполняется путем выявления и решения технологических размерных цепей. Методики выявления и расчета линейных технологических размерных цепей достаточно подробно описаны в технической литературе [1, 2]. Однако для угловых размерных цепей подобные методики отсутствуют. Важность таких методик объясняется более высоким уровнем точности угловых положений элементов деталей (должны быть в пределах допусков линейных размеров) и отсутствием регулировки угловых положений рабочих органов у большинства металлорежущих станков. Таким образом, усовершенствование методики оценки приемлемости техпроцессов с учетом специфики угловых размерных связей возникающих между элементами получаемых деталей и технологических систем является актуальной задачей.

2. Методика теоретического исследования. Комплексно и формализовано выявить технологические размерные цепи для всех чертежных размеров детали можно путем построения графов размерных связей техпроцесса [1, 2]. Такой граф является моделью размерных связей в отдельном координатном направлении, представленной парой структурированных множеств: 1) множество объектов (поверхности, линии, точки), последовательно пронумерованных на совмещенном эскизе детали, заготовки и промежуточных полуфабрикатов; 2) множество размеров между этими объектами, формирующихся при получении заготовки и в ходе мехобработки. Для одного координатного направления надо составить исходный и технологический графы. На схеме исходного графа вершины, символизирующие все пронумерованные объекты соединяют линиями-рёбрами, соответствующими исходным размерам (размерам детали, припускам, смещениям осей поверхностей). На технологическом графе эти же вершины соединяют рёбрами, соответствующими технологическим размерам, не зависящим от других размеров (размеры между технологическими базами и обрабатываемыми поверхностями, размеры, копируемые с инструментов, размеры заготовки). При совмещении указанных графов образуются замкнутые контуры из вершин и ребер. Каждый кратчайший замкнутый контур совмещенного графа соответствует технологической размерной цепи и используется для составления уравнения взаимосвязи номиналов ее звеньев. В левой части уравнения записывается обозначение исходного ребра со знаком «+». В правой части записываются обозначения ребер технологического графа в той последовательности, в которой они встречаются при обходе контура от границы исходного ребра с меньшим номером до его границы с большим номером. Обозначение технологического ребра записывают со знаком «+», если обход по нему происходит от вершины с меньшим номером к вершине с большим номером, и со знаком «-», если наоборот. После обхода всех кратчайших замкнутых контуров получается система линейных алгебраических уравнений (число уравнений должно

быть равно числу рёбер на исходном графе), представляющая математическую модель всех размерных связей техпроцесса по данному координатному направлению. В дополнение к каждому уравнению системы составляют уравнение или неравенство взаимосвязи допусков ребер и два уравнения или неравенства взаимосвязи предельных значений ребер, традиционно используемые при решении размерных цепей методом максимума-минимума [1]. Все составленные уравнения (неравенства) решаются совместно методом подстановки в таком порядке, чтобы в каждом решаемом уравнении оставался лишь один неизвестный параметр. Известными параметрами уравнений обычно являются: размеры детали и их допуски (из чертежа детали); допуски размеров, формы и расположения поверхностей заготовки (из стандартов или нормативов); допуски технологических размеров (из таблиц средней экономической точности обработки). При определении допуска технологического размера, получаемого от черновой технологической базы, к табличному допуску следует добавить погрешность формы технологической базы. Размерный анализ техпроцесса целесообразно начинать с оценки его приемлемости для достижения требуемой точности детали с помощью уравнений (неравенств) взаимосвязи допусков. Если они выдерживаются, то техпроцесс приемлем, и можно приступать к определению неизвестных параметров размерных цепей (технологических размеров, припусков, размеров заготовки). В противном случае необходимо корректировать схемы базирования, применять более точные методы обработки и оборудование.

В ходе теоретических исследований формирования угловых размеров деталей при мехобработке выявлен ряд особенностей составления графов и уравнений угловых размерных связей техпроцессов, а также решения таких уравнений:

1) полную информацию о размерных связях техпроцесса содержат исходные и технологические графы для трех координатных плоскостей детали, одну из которых следует совмещать с часто применяемой технологической базой (установочной, направляющей или двойной направляющей);

2) технологические угловые размеры следует задавать только от технологических баз, ориентирующих заготовки по угловым координатам;

3) если все элементы детали номинально перпендикулярны или параллельны друг другу, достаточно составить только уравнения взаимосвязи допусков их положений. Отклонения технологических размеров принимаются однонаправленными, дающими наибольшее отклонение объектов детали;

4) угловые допуски в мкм/мм следует привести к единой базовой длине.

5) графы и уравнения угловых размерных связей следует составлять и решить раньше графов и уравнений линейных размерных связей. Найденные угловые смещения объектов, входящие в исходный граф, используются как составляющие промежуточных припусков.

3. Результаты и обсуждение. Поясним описанные особенности на примере размерного анализа техпроцесса обработки корпуса (рисунок 1) по угловым размерам в плоскости YZ. Заготовкой является отливка в песчано-глинистой форме. Техпроцесс мехобработки включает следующие операции: операция 05 - вертикально-фрезерная (фрезерование плоскости 1); операция 10 - горизонтально-фрезерная с ЧПУ (переход 1 – черновое зенкерование отверстия 5, переход 2 – чистовое зенкерование отверстия 5, переход 3 – фрезерование плоскостей 2 с поворотом детали на 180º вокруг вертикальной оси, переходы 4, 5 – фрезерование поверхностей 11 и 12 с поворотом детали на 180º); операция 15 - вертикально-сверлильная (сверление 2-х отверстий 8). Операционные эскизы с технологическими размерами γ_j представлены на рисунке 1. Совмещённый эскиз детали и заготовки в проекции на плоскость YZ, представлен на рисунке 2. Этой проекции достаточно для указания всех объектов формируемых на всех стадиях обработки детали. На совмещённом эскизе номера соответствуют объектам: 1 - нижняя плоскость заготовки (В); 2 - нижняя плоскость детали (Б); 3 - плоскость дна канавки детали и заготовки (Д); 4 - верхняя плоскость основания детали; 5 - верхняя плоскость основания заготовки; 6 - ось крепежного отверстия в основании детали; 7 - ось главного отверстия детали (Е); 8 - ось главного отверстия после чернового зенкерования; 9 - ось отверстия заготовки; 10 - ось наружной цилиндрической поверхности заготовки (Г); 11 - поверхность отверстия заготовки; 12 - поверхность отверстия после чернового зенкерования; 13 - поверхность главного отверстия детали; 14 - наружная цилиндрическая поверхность заготовки; 15 - левая боковая поверхность детали; 16 - левая боковая поверхность заготовки; 17 - правая боковая поверхность детали; 18 - правая боковая поверхность заготовки; 19 - поверхность крепежного отверстия в основании детали. Угловые размеры и допуски, заданные на чертеже детали, на совмещенном эскизе имеют обозначение α_j, допуски формы и расположения элементов заготовки имеют обозначение β_j.

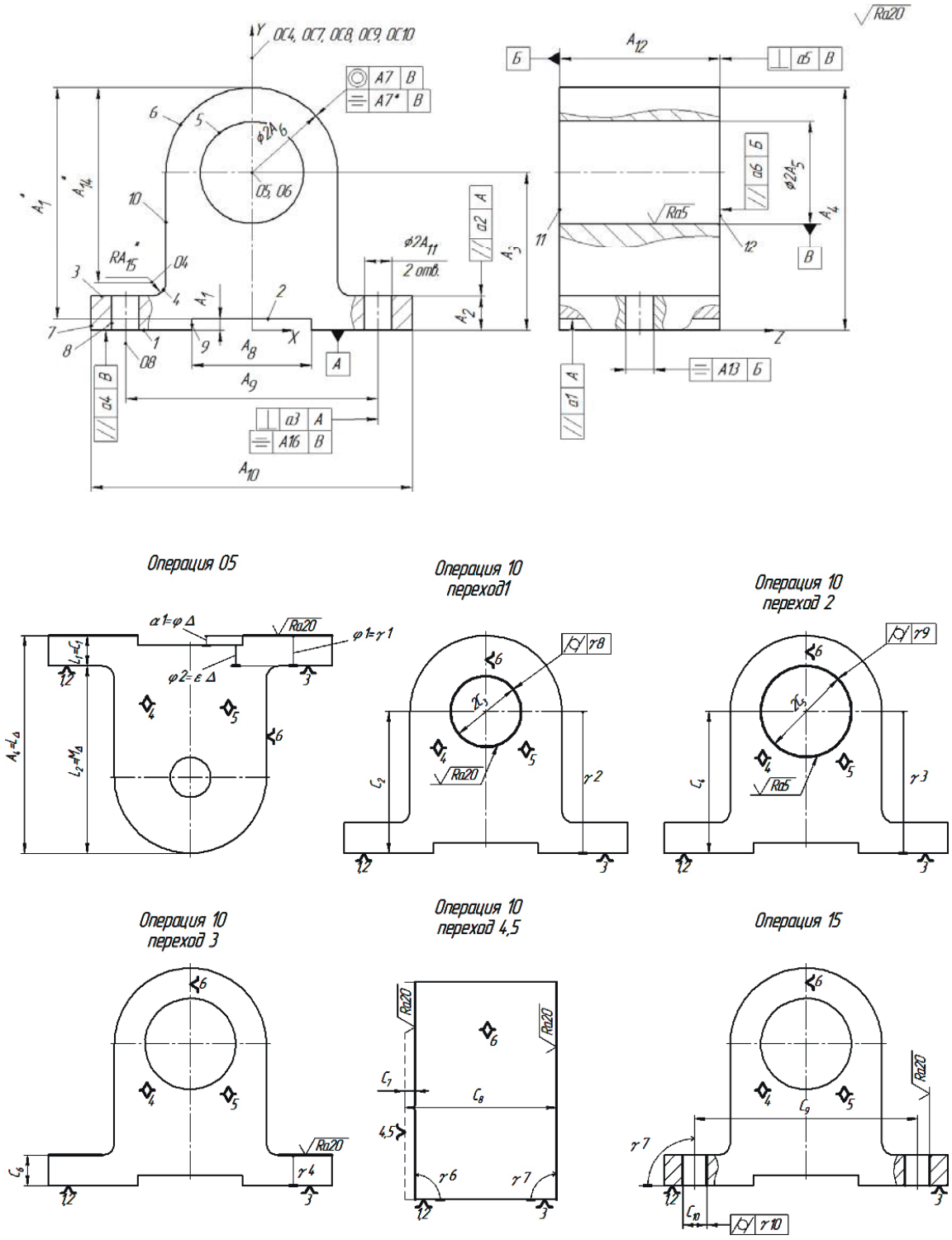


Рисунок 1 - Чертеж детали «корпус» и операционные эскизы ее обработки

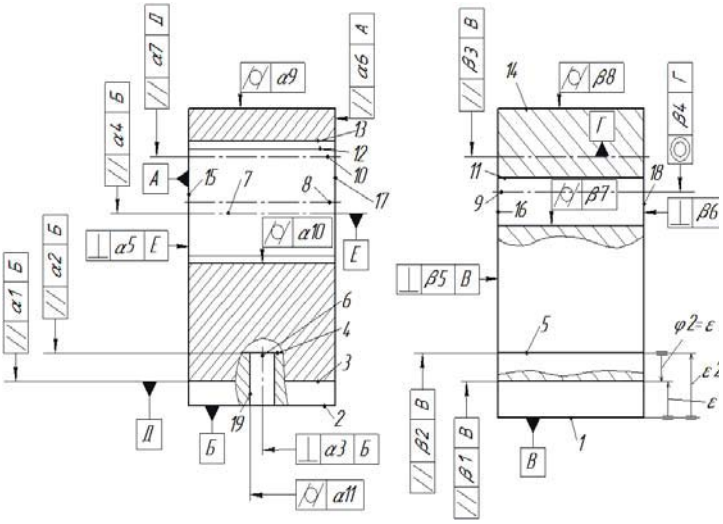


Рисунок 2 – Совмещенный эскиз детали и заготовки в проекциях на плоскость YZ

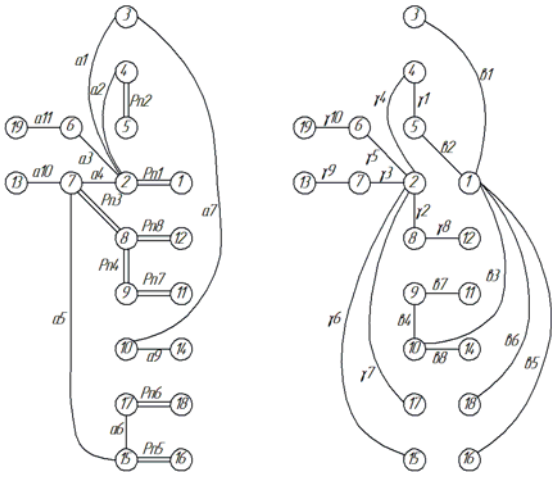


Рисунок 3 – Исходный и технологический графы угловых связей техпроцесса в плоскости YZ

На основе совмещенного эскиза и операционных эскизов построены исходный и технологический графы размерных связей техпроцесса (рисунок 3). На исходном графе, кроме угловых размеров и допусков детали, представлены угловые смещения ρ_i, являющиеся составляющими минимальных промежуточных припусков.

В нашем случае угловые номинальные положения объектов детали и заготовки известны из изображения проекций (0° или 90°), поэтому нет необходимости составлять уравнения размерных цепей в номиналах и предельных значениях. Достаточно составить выражения взаимосвязи допусков. Поочередно, мысленно перенося ребра исходного графа на технологический граф, получаем замкнутые кратчайшие контуры и составляем для них выражения взаимосвязи допусков размеров α_j, ρ_i, β_j, γ_j:

1) $T\alpha_1 \geq T\gamma_4 + T\gamma_1 + T\beta_2 + T\beta_1$

2) $T\alpha_2 \geq T\gamma_4$

3) $T\alpha_3 \geq T\gamma_5$

4) $T\alpha_4 \geq T\gamma_3$

5) $T\alpha_5 \geq T\gamma_3 + T\gamma_6$

6) $T\alpha_6 \geq T\gamma_6 + T\gamma_7$

7) $T\alpha_7 \geq T\beta_1 + T\beta_3$

8) $T\alpha_9 \geq T\beta_8$

9) $T\alpha_{10} \geq T\gamma_9$

10) $T\alpha_{11} \geq T\gamma_{10}$

11) $T\rho_{n1} = T\beta_2 + T\gamma_1$

12) $T\rho_{n2} = T\gamma_1$

13) $T\rho_{n3} = T\gamma_3 + T\gamma_2$

14) $T\rho_{n4} = T\gamma_2 + T\gamma_4 + T\gamma_1 + T\beta_2 + T\beta_3 + T\beta_4$

15) $T\rho_{n5} = T\gamma_6 + T\gamma_4 + T\gamma_1 + T\beta_2 + T\beta_5$

16) $T\rho_{n6} = T\gamma_7 + T\gamma_4 + T\gamma_1 + T\beta_2 + T\beta_6$

17) $T\rho_{n7} = T\beta_7$ 18) $T\rho_{n8} = T\gamma_8$

Для оценки приемлемости техпроцесса по точности размеров α_j следует проверить соблюдение выражений 1…10. Для этого выбранные по таблицам средней экономической точности [3] допуски $T\gamma_j$, и выбранные по ГОСТ 26645-85 допуски отливки $T\beta_j$ нужно привести к единой базовой длине (например, 100 мм). По остальным уравнения вычисляются погрешности перекосов $T\rho_i$, входящие в состав промежуточных припусков.

4. Выводы. Апробирование предлагаемой усовершенствованной методики на большом числе техпроцессов доказывает ее работоспособность. Использование методики на практике позволяет повысить качество технологической подготовки производства.

Список литературы

1. Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов: учебник: в 2-х частях / Беляков Н.В., Горохов В.А, Махаринский Е.И. и др.; Под ред. В.Н. Горохова, часть I. - Ст. Оскол: ТНТ, 2011. – 495с.

2. Проектирование технологии: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов/ И.М. Баранчукова, А.А. Гусев, Ю.Б. Крамаренко и др.; Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева.- М.: Машиностроение, 1990. - 416с.

3. *Косилова А.Г.,* Мещеряков Р.К., Калинин М.А. Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении: Справочник технолога. - М.; Машиностроение,1976. - 288с.

EVALUATION OF THE ACCEPTABILITY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF MECHANICAL TREATMENT TO ACHIEVE PRECISION ANGULAR DIMENSIONS OF PARTS

Medvedev O. A., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tm@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: Purpose - improvement of methodology for assessing the acceptability of the technological processes specific to angular dimension of relations between the size of components and technological systems. Peculiarities of preparation of graphs and equations angular dimension relations process, as well as for solving equations. Graphs and equations angular dimension the links should be up and decide to graphs and equations of linear size relations. It helps to create a baseline and process count for the three coordinate planes in the part. In identifying technological angular dimensions to take into account technological base capable of orienting the workpiece in a corner of the coordinate directions. When preparing a graph of dimensional relationships to one coordinate plane are excluded from consideration angle dimensions lying in planes perpendicular to it. If all features in the part nominally perpendicular or parallel to each other, enough to be only the expression of the interrelationship of tolerances of parallelism and perpendicularity. For comparison, these tolerance values in μm/mm are converted to the same reference length. An example of using the technique.

Keywords: The manufacturing machining process, precision angular dimensions, technological system, graphs of the angular dimension relations, equations of dimensional relations.

УДК 621.757

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ ПРИ НЕИДЕНТИЧНЫХ ЗАКОНАХ РАССЕЯНИЯ РАЗМЕРОВ ЗВЕНЬЕВ

А.А. ПАНОВ, канд. техн. наук, доцент,
К.Л. МОИСЕЕНКО, магистрант
(АлтГТУ, г. Барнаул, Россия)

Панов А. А. 656038, г. Барнаул, пр. им. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова.
e-mail: agtu-otm2010@mail.ru

Аннотация: Для реализации метода групповой взаимозаменяемости при сборке прецизионных пар считается необходимой идентичность законов рассеяния размеров вала и отверстия. В работе показаны условия применения метода при отличающихся законах, приведены зависимости для определения соотношения допусков и границ групп.

Ключевые слова: селективная сборка, групповая взаимозаменяемость, закон рассеяния, соотношение допусков, границы групп.

Одним из возможных способов получения заданной точности сборки является селективная сборка, при которой сборочный комплект составляют детали, предварительно отобранные по принятым характеристикам из числа годных. Однако применение селективной сборки в машиностроении достаточно ограничено, и одна из причин этого – возможная некомплектность. Она проявляется как неодинаковое число собираемых деталей в одноименных группах после сортировки.

Анализ состояния вопроса показал, что в условиях массового производства теоретически можно избежать некомплектности деталей в группах. Для этого необходимо равенство допусков составляющих звеньев и идентичность законов рассеяния их размеров [1, 2]. Однако, если детали, входящие в изделие, имеют несовпадающие законы рассеяния размеров, то будет наблюдаться явление некомплекта из-за различия количества деталей, находящихся в одноименных группах.

Объем некомплектности можно свести до приемлемых величин (а теоретически – свести к нулю), если отказаться от классических условий соотношения допусков T_1 и T_2 и деления их на равные группы.

В конечном счете, важно обеспечить следующие условия:
– одинаковое количество деталей 1 и 2 в одноименных группах;
– одинаковую и равную расчетную величину поля рассеяния размеров замыкающего звена во всех группах;
– одинаковое расположение поля рассеяния размеров замыкающего звена относительно номинала во всех группах.

Исходя из этих условий, нужно выполнить расчеты необходимого соотношения допусков T_1 и T_2 с исходным T и границ групп.

Предварительный анализ вышеприведенных условий показывает, что при их выполнении классические условия применения метода групповой взаимозаменяемости соблюдаться не будут:
– допуски увеличивающего и уменьшающего звена могут быть неравными ($T_1 \neq T_2$), однако их сумма должна быть прежней: $T_1 + T_2 = 2T$;
– границы групп могут делить допуски на неравные интервалы.

Наиболее распространенными в машиностроении являются следующие законы рассеяния размеров в партии деталей:
– закон Гаусса (Г);
– закон Симпсона (С);
– закон равной вероятности (РВ).

Ниже рассмотрено сочетание закона равной вероятности для размеров отверстия и закона Симпсона (треугольника) для размеров вала при числе групп сортировки $k = 3$ в трехзвенной размерной цепи (рисунок 1).

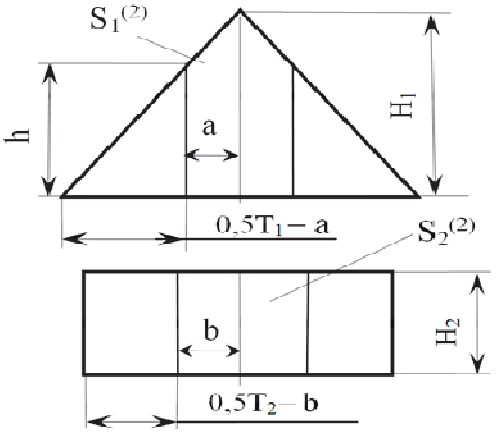


Рисунок 1 – Расчетная схема

Согласно условиям, составляем три уравнения:

$$S_1^{(1)} = S_2^{(1)}; \quad (1)$$

$$\Delta_{01}^{(2)} = \Delta_{02}^{(2)}; \quad (2)$$

$$\omega_1^{(1)} + \omega_2^{(1)} = \omega_1^{(2)} + \omega_2^{(2)}, \quad (3)$$

где $S_i^{(j)}$ – вероятность попадания размеров i-й детали в группу j; $\Delta_{0i}^{(j)}$ – координата середины поля рассеяния $\omega_i^{(j)}$ размеров i-й детали в группе j;

Полная вероятность $S_1 = S_2 = 1$.

Для закона Симпсона $S_1 = 0{,}5\,T_1H_1$, откуда: $H_1 = 2/T_1$; для закона равной вероятности $H_2T_2 = 1$, и $H_2 = 1/T_2$.

Из соотношения параметров треугольника можно составить уравнение $\frac{h}{0{,}5T_1 - a} = \frac{H_1}{0{,}5T_1}$, откуда $h = \frac{2}{T_1}(1 - 2c)$, где $c = a/T_1$. С учетом этого:

$$S_1^{(1)} = \frac{h + H_1}{2} a = 2c(1 - c), \quad (4)$$

$$S_2^{(1)} = bH_2 = b\frac{1}{T_2} \quad (5)$$

По условию (1) $S_1^{(1)} = S_2^{(1)}$, то есть

$b\frac{1}{T_2} = 2c(1 - c)$, откуда получим:

$$b = 2c(1 - c)T_2. \quad (6)$$

Координаты середин групповых допусков:

$$\Delta_{01}^{(2)} = a + \frac{0{,}5T_1 - a}{2} = \frac{T_1}{4}(2c + 1); \quad (7)$$

$$\Delta_{02}^{(2)} = b + \frac{0{,}5T_2 - b}{2} = \frac{T_2}{4}(4c(1 - c) + 1). \quad (8)$$

По условию (2) $\Delta_{01}^{(2)} = \Delta_{02}^{(2)}$, то есть:

$$\frac{T_1}{4}(2c + 1) = \frac{T_2}{4}(4c(1 - c) + 1) \quad (9)$$

Необходимое соотношение допусков T_1 и T_2:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{4c(1-c)+1}{2c+1}. \quad (10)$$

Решаем условие (3):

$$2a + 2b = (0{,}5T_1 - a) + (0{,}5T_2 - b). \quad (11)$$

Подставив выражение (1), имеем

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{12c(1-c)-1}{1-6c}. \quad (12)$$

Из уравнений (9) и (10) получено уравнение третьей степени:

$$-24c^3 + 20c^2 + 6\,c - 1 = 0. \quad (13)$$

Решив уравнение, получили значение c = 0,1234149.

Подставляя его последовательно в (6) и (10), получаем соотношение допусков и границы групп a и b относительно середин полей рассеяния.

По аналогичной методике решаются задачи деления на группы звеньев с иными сочетаниями законов рассеяния их размеров. Для сочетаний, в которых один из размеров имеет рассеяние по нормальному закону, решение находилось численными методами, поскольку интегральная кривая распределения для закона Гаусса не имеет аналитического выражения. Проверочные расчеты показали, что поля рассеяния размеров замыкающего звена одинаковы во всех группах. Одинаковы также и координаты середин полей рассеяния замыкающих звеньев во всех группах.

Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Выполненные исследования показали принципиальную возможность экономичного применения метода селективной сборки изделий с несовпадающими законами рассеяния размеров составляющих звеньев.

Таблица 1 – Параметры звеньев цепи при расчете по предлагаемой методике

Закон рассеяния размеров		Допуски звеньев		Границы средней группы		Количество деталей в группах, %						Некомплект
						1-е звено			2-е звено			
1-е звено	2-е звено	T_1	T_2	1-е звено	2-е звено	группы						
				a	*b*	1	2	3	1	2	3	
С	РВ	1,069Т	0,931Т	$\pm0{,}124T_1$	$\pm0{,}216T_2$	28,4	43,2	28,4	28,4	43,2	28,4	0
Г	РВ	1,098Т	0,902Т	$\pm0{,}107T_1$	$\pm0{,}239T_2$	26,1	47,8	26,1	26,1	47,8	26,1	0
Г	С	1,034Т	0,966Т	$\pm0{,}145T_1$	$\pm0{,}190T_2$	19,2	61,6	19,2	19,2	61,6	19,2	0

Список литературы

1. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения / И. М. Колесов. – М. : Высш. школа, 2001. – 592 с.

2. РД 50-635-87. Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей.

FEATURES OF APPLICATION OF SELECTIVE ASSEMBLY WITH NON-IDENTICAL LAWS OF SCATTERING DIMENSIONS LINKS

Panov A.A., C.Se. (Engineering), Associate Professor, e-mail: agtu-otm2010@mail.ru
Moiseenko K.L., Undergraduate, e-mail: klmoiseenko@mail.ru

FGBOU VPO «Altai State Technical University name of I. I. Polzunov»,
46 Lenin Prospect, Barnaul, 656038, Russian Federation

Abstract: To implement the method of the group interchangeability when assembling precision pairs the identity of the laws of the dispersion of the sizes of the shafts and the hole is considered essential. The paper shows the condition of application of the method under different laws. The dependences of determining the ratio of tolerances and the boundaries of groups.

Keywords: selective assembly, interchangeability group, the law of scattering, the ratio of the tolerance, the boundaries of groups.

УДК 621.9.01; 621.791.947.55

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ КРОМОК РЕЗА

Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор,
Н.П. ГААР, канд. техн. наук, доцент,
А.И. ЖУРАВЛЕВ, доцент,
А.А. ЛОКТИОНОВ, ст. преподаватель
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)

Локтионов А.А. – 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: pushkin-lok@mail.ru

Аннотация: Исследовано влияние скорости резания при тонкоструйной плазменной резке стали Ст3 на перпендикулярность кромок (правой и левой) и ширину реза. Экспериментально установлено, что с увеличением скорости резания неперпендикулярность кромок реза увеличивается, а ширина реза уменьшается. Определена скорость реза, при которой перпендикулярность правой кромки реза имеет оптимальное значение – 1,16 м/мин. Выявлено, что изменение геометрии реза в исследованном диапазоне скоростей связано со смещением анодного пятна в канале реза, приводящего к изменению теплопередачи от столба плазменной дуги обрабатываемому материалу.

Ключевые слова: Тонкоструйная плазменная резка, анодное пятно, неперпендикулярность кромок, точность обработки, ширина реза.

1. Введение

Тонкоструйная плазменная резка является современным технологическим методом раскроя листовых металлических материалов в заготовительном производстве [1]. Данный метод показал свою эффективность как для резки материалов различных классов (углеродистых, нержавеющей сталей, цветных металлов и сплавов) [2-5]. В последнее время появились исследования, направленные на расширение технологических возможностей данного метода за счет обработки биметаллических композиций [6-7]. Исследованию вопросов формирования точности и качества реза при тонкоструйной плазменной резке посвящены работы [8-12], в которых приведена оптимизация технологических режимов. Важным моментом в исследовании различных технологических процессов является изучение износа расходных элементов и его влияние на показатели точности и качества обработки. Изучению этого вопроса посвящены исследования авторов [13-14], а в работах [1, 15] – отражены рекомендации по повышению ресурса работы расходных элементов плазматрона.

Тонкоструйная плазменная резка является современной модификацией плазменно-дугового раскроя с дополнительным обжатием столба плазменной дуги. Одним из элементом процесса, ответственного за формирование канала реза является местоположение анодного пятна. По данным работы [16] на положение анодного пятна в канале реза влияет скорость раскроя, что в свою очередь определяет перпендикулярность кромок реза. В работе [17] показано влияние скорости обработки на положение анодного пятна.

Для расширения технологических возможностей по раскрою бóльших толщин необходимо применение соответствующих способов пробивки материала [18], которые отвечают за формирование канала через который происходит удаление продуктов расплава из зоны обработки.

Данная работа посвящена выявлению особенностей влияния скорости обработки на перпендикулярность кромок и ширины реза в условиях тонкоструйной плазменной обработки.

2. Методика экспериментального исследования

Эксперименты проводились на установке тонкоструйной плазменной резки с использованием технологии HiFocus^{plus}. Режимы обработки (таблица 1), используемые газы и их расходы (таблица 2) были выбраны в соответствии с рекомендациями производителя оборудования (фирма Kjellberg, Германия).

Таблица 1

Толщина реза, мм	Ток, А	Скорость обработки, м/мин	Время пробивки, сек	Высота пробивки, мм	Высота реза, мм	Напряжение, В
6	50	0,6	0,3	3	2	125
		1,0				
		1,5				
		2,0				
		2,4				

Диапазон варьирования скорости обработки определялся ±30% и ±60% от рекомендованного значения.

Таблица 2

Технология резки	Толщина реза, мм	Зажигающий газ - воздух (давление/ расход)	Режущий газ – кислород (давление/ расход)	Завихряющий газ 1 – кислород (давление/ расход)	Завихряющий газ 2 – азот (давление/ расход)
HiFocus^{plus}	6	5 бар/20 дел. шкалы	10 бар/20 дел. шкалы	-	5 бар/40 дел. шкалы

В качестве обрабатываемого материала был выбран сортовой прокат из конструкционной стали Ст 3 (ГОСТ 14637-89) толщиной 6 мм.

Экспериментальные исследования выполнялись на установке и в соответствии с методикой оценки показателей точности обработки, представленных в работе [19]. В настоящей работе определялись такие параметры, как перпендикулярность кромок, а также ширина реза на верхней и нижней его кромках.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию скорости обработки на перпендикулярность кромок реза.

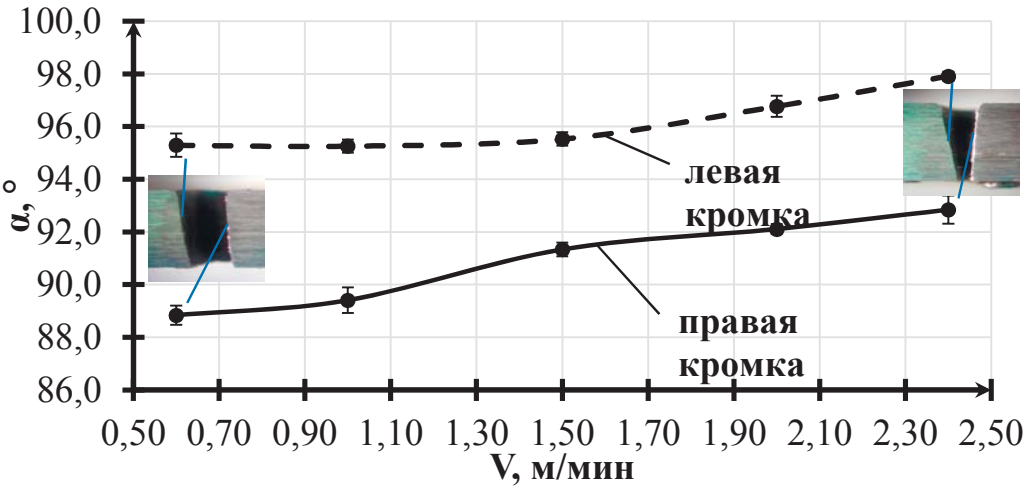


Рисунок 1 - Зависимости перпендикулярности кромок от изменения скорости резки

В области малых скоростей (0,6 – 1,16 м/мин) для рассматриваемой технологии раскроя значение перпендикулярности правой кромки изменяется в диапазоне от 88,8° до 90°. При значении скорости резки 1,16 м/мин обеспечивается максимальная точность реза по правой кроме. В связи с этим, целесообразно назначать такое направление обхода при раскрое, чтобы контур изделия формировался правой кромкой. Дальнейшее увеличение скорости приводит к увеличению отмеченного параметра. Данный факт объясняется тем, что при малых скоростях обработки время воздействия теплового источника, осуществляющего нагрев обрабатываемого материала вплоть до его расплавления, оказывается достаточным, чтобы фронт расплава по каналу реза оказался на максимально возможном расстоянии от оси теплового источника. Последнее определяет наличие вокруг столба плазменной дуги оболочки изолирующего газа, которая в свою очередь способствует заглублению анодного пятна. Как отмечалось в работе [17], положение анодного пятна определяет характер теплопередачи в канале реза, а, следовательно, и вынос продуктов расплава из зоны обработки. Увеличение скорости обработки приводит к тому, что время воздействия теплового источника на обрабатываемый материал уменьшается, что приводит к меньшему проплавлению (уменьшению ширины реза, рис. 2) и, как следствие, утончению газовой оболочки, и, соответственно, к смещению анодного пятна в сторону верхней кромки реза. Отмеченный факт и определяет наклон кромок реза, то есть их перпендикулярность.

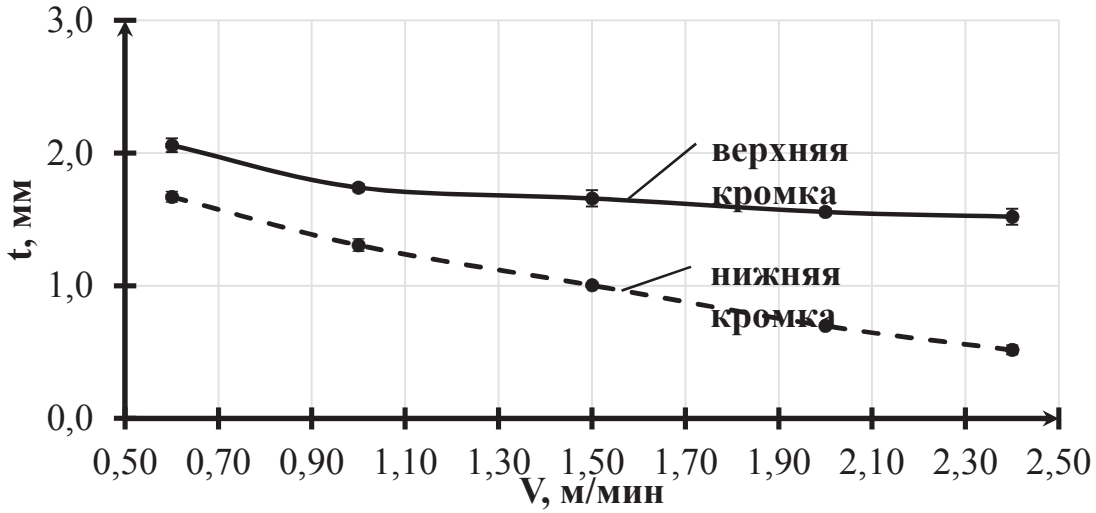


Рисунок 2 - Зависимости ширины реза от изменения скорости резки

4. Выводы

Таким образом, влияние скорости тонкоструйной плазменной резки на точность обработки связано со смещением положения анодного пятна в канале реза, что приводит к изменению процессов теплопередачи от теплового источника к обрабатываемому материалу. Для условий данных исследований оптимальной с позиции достигаемой точности (перпендикулярности) по правой кромке реза является скорость обработки 1,16 м/мин.

Список литературы

1. *Рахимянов Х.М., Локтионов А.А.* Повышение эффективности листового раскроя в заготовительном производстве // Ползуновский альманах. – 2012. - №1. – С. 158-159.

2. *Рахимянов Х.М., Рахимянов А.Х.* Влияние режимов тонкоструйной плазменной резки на качество обработки нержавеющей стали 12Х18Н10Т// Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., 23 сентября 2014 г. Барнаул. 2014 г. С. 78-85.

3. *Рахимянов Х.М., Рахимянов К.Х., Рахимянов А.Х., Шопф С.В., Захаров В.В.* Исследование обрабатываемости стали 12Х18Н10Т методом тонкоструйной плазменной резки// Инновации в машиностроении. Труды 4-й Международной научно-практической конференции, 2013 г. С. 38-44.

4. *Рахимянов А.Х.* Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов / А.Х. Рахимянов // Иннов. в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Часть 2 / под ред. А.Г. Суслова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – С. 66 – 70.

5. *Рахимянов А.Х.* Технологические особенности плазменного раскроя алюминиевых сплавов / А.Х. Рахимянов, Б.А. Красильников // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Часть 2 / под ред. А.Г. Суслова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – С. 71 – 77.

6. *Рахимянов А.Х., Рахимянов Х.М., Красильников Б.А.* Технологические особенности раскроя биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при тонкоструйной плазменной резке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. - № 3 (64). – С. 51 – 67.

7. Рахимянов *Х.М., Рахимянов А.Х., Журавлев А.И.* Технологические возможности тонкоструйной плазменной резки в обработке биметаллических композиций//Электротехника, энергетика, машиностроения.ЭЭМ-2014. I Международная научная конференция молодых ученых: сборник научных трудов 2014 г. С.141-144.

8. *Рахимянов Х.М., Локтионов А.А.* Влияние технологий тонкоструйной плазменной резки на формирование шероховатости поверхности реза // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. 7 междунар. науч.-техн. конф., Томск, 11-13 нояб. 2013 г. Томск. - 2013. – С. 349-353.

9. *Рахимянов Х.М., Локтионов А.А.,* Никитин Ю.В. Оценка геометрической точности реза листовых материалов при различных технологиях тонкоструйной плазменной резки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2013. - № 3 (60). - С. 25-30.

10. *Локтионов А.А.* Оценка качества реза листовых материалов при тонкоструйной плаз-

менной резке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2013. - № 4 (61). - С. 86-91.

11. *Рахимянов Х.М., Локтионов А.А.* Особенности формирования кромок при тонкоструйной плазменной резке листового материала // Инновации в машиностроении: тр. 2 междунар. науч.-практ. конф., 6–8 окт. 2011 г. Кемерово. - 2011. – С. 416–419.

12. *Рахимянов Х.М., Локтионов А.А.* Точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов и пути ее повышения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2009. - №4 (45). - С.31-32.

13. *Рахимянов Х.М., Локтионов А.А.* Разновидности катодов, применяемых для плазменной резки, и влияние степени износа их на точность формообразования // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 10-й Всерос.научно-практической конференции, 28 марта 2012 г. Новосибирск. - 2012. - С. 68-71.

14. *Рахимянов Х.М., Локтионов* А.А. Влияние износа расходных элементов на точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 4 (53). – С. 14–18.

15. *Локтионов А.А., Журавлев А.И.,* Рахимянов А.Х. Повышение ресурса работы расходных элементов плазмотрона при тонкоструйной плазменной резке // Электротехника. Энергетика. Машиностроение. ЭЭМ-2014: сб. науч. тр. I междунар. науч. конф. Новосибирск. - 2014. С. 105-108.

16. *Ширшов И.Г., Котиков В.Н.* Плазменная резка. -Л.: Машиностроение, 1987. 192 с.

17. *Рахимянов Х.М., Гаар Н.П., Журавлев А.И., Локтионов А.А., Рахимянов А.Х.* Влияние скорости обработки на положение анодного пятна и перпендикулярность кромок при тонкоструйном плазменном раскрое // Механики XXI веку. – 2015. - №14. – С. 119-122.

18. *Рахимянов Х.М., Локтионов А.А.* Выбор способа пробивки при тонкоструйном плазменном раскрое листовых материалов // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., 23 сентября 2014 г. Барнаул. - 2014. – С. 91–95.

19. *Рахимянов Х.М., Локтионов А.А.* Точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов и пути ее повышения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2009. - №4 (45). - С.31-32.

EFFECT OF SPEED OF HIGH-PRECISION PLASMA CUTTING ON THE ACCURACY OF CUT EDGE FORMATION

Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru
Gaar N.P., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: lianelas@mail.ru
Zhuravlev A.I., Associate Professor, e-mail: ftcenter@ngs.ru
Loktionov A.A., lecturer, e-mail: pushkin-lok@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

Abstract: The effect of cutting speed during high-precision plasma cutting of steel St3 on perpendicularity of cut edges (right and left) and kerf. It was established experimentally that with increasing cutting speed the perpendicularity of cut edge increases, and the width of the cut decreases. The cutting speed, at which the perpendicularity of right cut edge has an optimum value - 1.16 m per min. It was found that a change in the geometry of the cut in the range of speeds studied, associated with the displacement of the anode spot in the cut channel, resulting in a change in the heat transfer from the plasma arc to the material to be cut.

Keywords: high-precision plasma cutting, anode spot, perpendicularity of cut edges , cutting accuracy, kerf.

УДК 621.9.047

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор,
Б.А. КРАСИЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, профессор,
К.Х. РАХИМЯНОВ, канд. техн. наук, доцент,
(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 статье рассмотрены особенности аморфных и нанокристаллических сплавов как конструкционных материалов. Показана специфика изделий из рассматриваемого класса сплавов и выявлены ограничения при их механической обработке. Предложено размерную обработку изделий осуществлять с использованием электрохимической размерной обработки. Учитывая имеющие место ограничения, связанные с образованием окисных пленок химических элементов, входящих в состав аморфных и нанокристаллических сплавов, рассмотрены возможные механизмы интенсификации электрохимического растворения обрабатываемого материала. Принимая во внимание необходимые объемы удаляемого материала и возможность технической реализации, предложено использовать механическую интенсификацию ЭХРО, заключающуюся в постоянном обновлении анодной поверхности. Выбран способ механической интенсификации – электроалмазная обработка и установлены оптимальные режимы обработки, обеспечивающие решение технологической задачи по прорезке пазов в железе статора, выполненного из нанокристаллического сплава 5БДСР.

Ключевые слова: аморфные и нанокристаллические сплавы, электрохимическая размерная обработка, лазерная интенсификация, электроалмазное шлифование.

1. Введение

Широкий интерес к аморфным и нанокристаллическим материалам обусловлен теми преимуществами, которые дает их применение в различных отраслях техники. Причиной этому служат, связываемые с применением этих материалов, перспективы в экономии энергии и возможность реализации их новых свойств в изделиях [1, 2]. Широкомасштабные научные и инженерные исследования развернулись благодаря установлению факта наличия ферромагнетизма в аморфных и нанокристаллических сплавах. Важность этого достижения можно оценить по тому факту, что при полной замене ныне используемых электротехнических сталей нанокристаллическими ферромагнитными материалами только в одном случае применения – в сердечниках распределительных трансформаторов будет сэкономлено около двух третей рассеиваемой электроэнергии [3]. Аналогично можно снизить расходы на электроэнергию при использовании этих материалов в электрических моторах, в мощных кондиционирующих установках.

Настоящая статья посвящена теоретическому обоснованию выбора аморфных и нанокристаллических сплавов как конструкционных материалов и поиску практических путей для их обработки с учетом специфики свойств, как самих сплавов, так и особенностей их соединения в изделии.

2. Теория

Для такого класса материалов характерными являются необычные магнитные, механические, электрические свойства, а также коррозионная стойкость. Эти материалы проявляют исключительно высокие механические свойства – твердость и прочность при растяжении, а в ряде случаев имеют близкий к нулю коэффициент теплового расширения и высокое значение удельного электросопротивления. При этом уровень электромагнитных потерь в нанокристаллических сплавах с высокой магнитной индукцией оказывается существенно ниже, чем во всех известных кристаллических сплавах (рис. 1, 2) [4].

Сравнение статических магнитных характеристик нанокристаллического сплава 5БДСР и традиционной электротехнической стали выявило существенную разницу в удельных массовых потерях (Pm = 0,018 Вт/кг и Pm = 0,410 Вт/кг – для сплава 5БДСР и электротехнической стали соответственно), что подтверждает сравнение форм их петель гистерезиса (рис. 1, 2).

При увеличении частотной характеристики удельные массовые потери изделий из электротехнической стали несравнимо велики по сравнению с нанокристаллическим сплавом 5БДСР (рис. 3, 4).

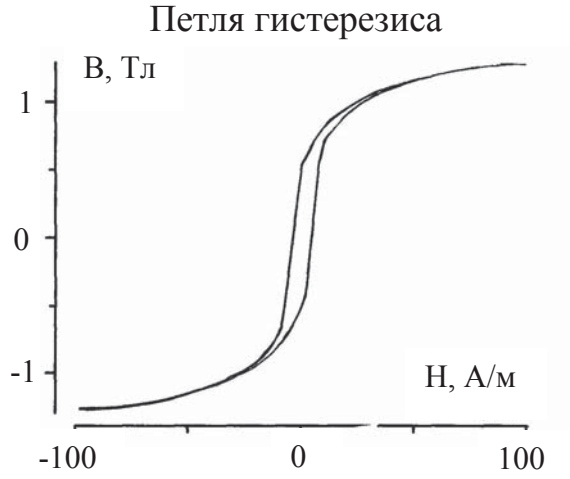


Рисунок 1 - Статические магнитные характеристики нанокристаллического сплава 5БДСР, Pm=0,018 Вт/кг

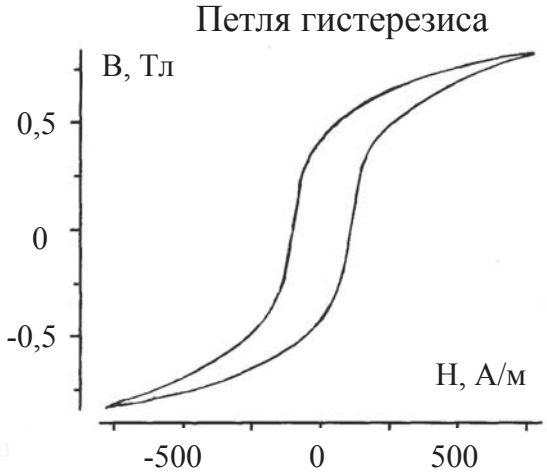


Рисунок 2 - Статические магнитные характеристики электротехнической стали, Pm=0,410 Вт/кг

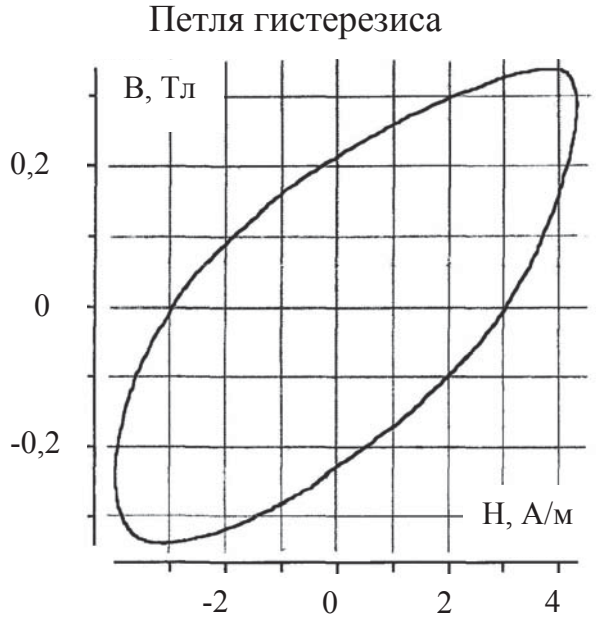


Рисунок 3 - Динамические магнитные характеристики нанокристаллического сплава 5БДСР, Pm=0,591 Вт/кг

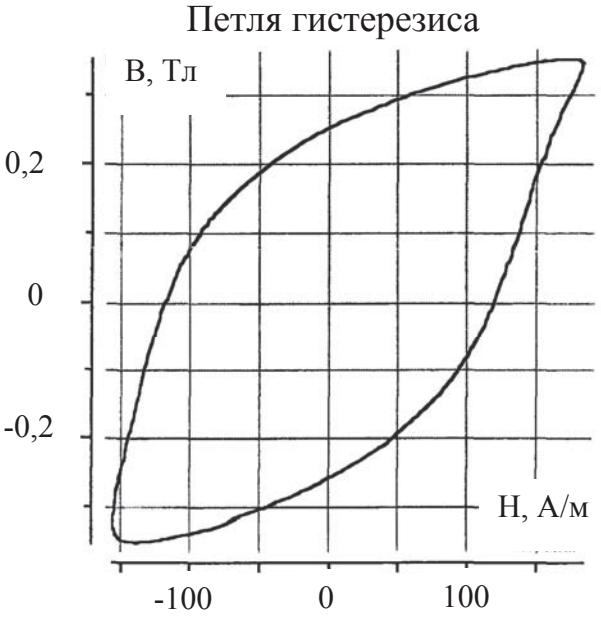


Рисунок 4 - Динамические магнитные характеристики электротехнической стали, Pm=25,135 Вт/кг

Аморфные и нанокристаллические материалы, вследствие их структурных особенностей, являются изотропными. Поэтому в этих сплавах такие механические характеристики, как модуль Юнга (E), модуль сдвига (G), модуль объемной упругости (B) на 30 – 50 % ниже, чем в металлах, обладающих кристаллической структурой. Это объясняется тем, что сила межатомного взаимодействия в подобном материале меньше, чем в кристаллическом [5].

В таблице приведены основные физические характеристики аморфного 82К3ХСР и нанокристаллического 5БДСР сплавов [6].

Изделия, изготавливаемые из аморфных и нанокристаллических сплавов, представляют собой различного рода магнитопроводы, которые по своей конструкции могут быть разрезными, либо подвергаться последующей механической обработке (рис. 5). При этом необходимо учитывать, что материал конструкции специфичен и представляет собой чередование тонких

(25 – 30 мкм) металлических (аморфных и нанокристаллических) лент, соединенных между собой органической связкой (рис. 6). Если твердость металлической составляющей в изделии высока (до 12 ГПа), то связка обладает низкой прочностью (0,4 ГПа).

При использовании данного вида сплавов в конструкции изделия необходимо учитывать при выборе методов обработки высокую чувствительность аморфных и нанокристаллических сплавов к термическому воздействию [7]. Это подтверждают данные о температурах кристаллизации аморфного 82К3ХСР и нанокристаллического 5БДСР сплавов, представленных в таблице.

Таблица 1 - Основные физические характеристики сплавов

№ п/п	Физические характеристики	Марка сплава	
		82К3ХСР	5БДСР
1	Температура Кюри, °С	180	350
2	Температура начала кристаллизации, °С	510	530
3	Плотность, г/см^3	7,7	7,6
4	Твердость, ГПа	10,3	10,2
5	Удельное электрическое сопротивление, МОм×м	1,40	1,60
6	Константа магнитострикции $\times 10^{-6}$	0,00	1,00
7	Максимальная температура длительного применения, °С	90	240



Рисунок 5 - Изделия из аморфных и нанокристаллических сплавов

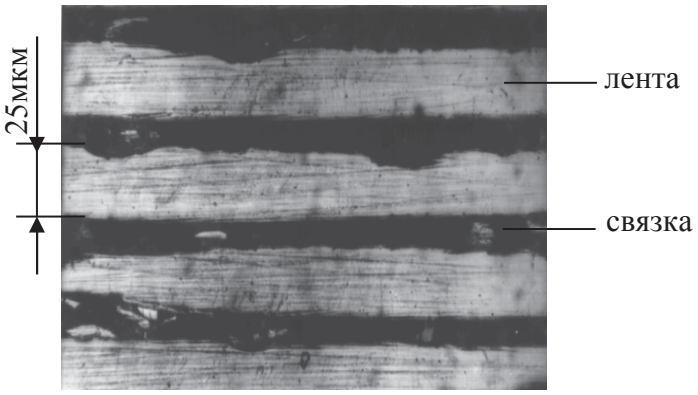


Рисунок 6 - Строение изделия из нанокристаллического сплава 5БДСР

3. Результаты и обсуждения

Учитывая высокую твердость аморфных и нанокристаллических сплавов, их чрезвычайную хрупкость, наличие неметаллической связки в изделии, а также чувствительность к температурным воздействиям, становится очевидным невозможность использования традиционных методов лезвийной обработки. Попытки их применения для обработки рассматриваемого класса изделий сопровождалась чрезмерным износом твердосплавного инструмента, не обеспечивая требуемой точности обработки из-за выкрашивания материала вследствие его хрупкого разрушения. Алмазное шлифование на режимах, исключающих температурное и деформационное воздействие на материал, не обеспечивало приемлемой производительности процесса.

Очевидным является необходимость использования в обработке аморфных и нанокристаллических сплавов одного из методов электрофизикохимической обработки. Принимая во внимание рассмотренные выше ограничения в обработке данных материалов, наиболее привлекательной является электрохимическая размерная обработка (ЭХРО) металлических материалов, характеризуемая отсутствием механического и температурного воздействия на обрабатываемый материал [8].

В работе [9] с помощью поляризационных исследований были выявлены ограничения, связанные с образованием труднорастворимых

окисных пленок при ЭХРО сплава 5БДСР. Появление различных окисных пленок в результате химических реакций связано со сложным химическим составом исследуемых материалов.

Известны пути интенсификации ЭХРО, основанные на лазерной, механической, гидродинамической активации процесса [10 – 14]. Экспериментальные исследования по лазерной интенсификации ЭХРО различных материалов подтвердили его эффективность[15 – 21]. Однако сложность технологического оборудования для реализации [22, 23] вносит определенные ограничения в промышленную реализацию.

Достаточно просто с технической точки зрения осуществляется механическая интенсификация электрохимического процесса, заключающаяся в постоянном обновлении анодной поверхности, что реализуется в рамках электроалмазной обработки (ЭАШ) [24 – 26].

Как известно, электроалмазное шлифование является комбинированным методом обработки. В процессе электроалмазного шлифования постоянный ток от круга к детали протекает через слой электролита, занимающего пространство между зернами круга, являющимися хорошими диэлектриками. При этом в зоне обработки происходит диссоциация атомов обрабатываемого металла, обеспечивающая анодное растворение его тончайшего слоя, с образованием на поверхности окисной анодной пленки, обладающей высоким электрическим сопротивлением. Зерна работающего шлифовального круга непрерывно удаляют эту пленку. Непрерывное образование и удаление анодной пленки зернами круга (механическая депассивация) обеспечивает высокую интенсивность съема металла.

Известно [27, 28], что при оптимально подобранных режимах обработки основная часть припуска (до 85 %) должна удаляться в результате стабильного электрохимического растворения и остальная часть (15 – 10 %) – в результате микрорезания и электроэрозионного воздействия на обрабатываемую деталь.

Оптимальные электрические режимы реализуют низкие напряжения (6 – 9 В) для избежания значительных электроэрозионных процессов на обрабатываемой поверхности и высокую плотность тока порядка (80 – 100 А/см^2). Оптимальной скоростью резания при ЭАШ является V = 22 – 25 м/с [29]. Установлено, что дальнейшее возрастание скорости практически не увеличивает производительность, и резко увеличивает износ алмазного круга. Важным параметром режимов ЭАШ является удельная нагрузка круга на деталь, в основном определяющая значение межэлектродного зазора, а, следовательно, и протекание сопутствующих анодному растворению процессов микрорезания и электроэрозии.

Температуры, возникающие в зоне обработки при электроалмазном шлифовании, как известно, не достигают величин температур начала кристаллизации нанокристаллических и аморфных сплавов (500 – 550 °С), соответственно, не оказывают губительного влияния на обрабатываемые материалы и не приводят к кристаллизации и потере ими уникальных магнитных свойств [7].

На рисунке 7 представлено изделие – железо статора электрической машины с прорезанными электроалмазным шлифованием пазами под дальнейшую укладку обмотки.

Исследование точности формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристаллических сплавах выполнено в исследованиях [30]. Подробное описание схемы модернизации технологического оборудования для электроалмазного шлифования представлено в работе [31].

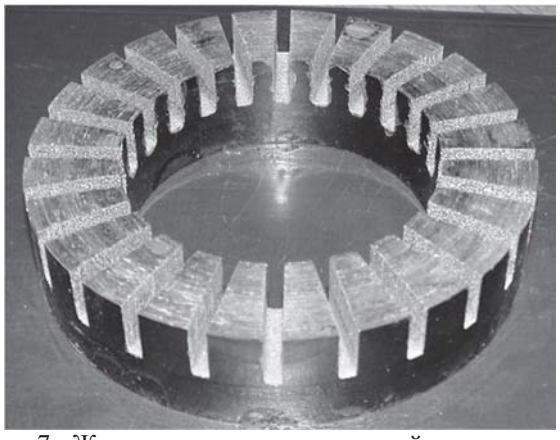


Рисунок 7 - Железо статора электрической машины

4. Выводы

Таким образом, анализ химико-механических особенностей обработки высокопрочных материалов комбинированным методом – методом электроалмазного шлифования показал на перспективность его применения для обработки аморфных и нанокристаллических сплавов. Сопоставление условий обработки, определяемых спецификой исследуемых материалов и реализуемых механизмов ЭАШ показало на возможность обработки изделий из аморфных и нанокристаллических сплавов с высокой производительностью, требуемой точностью и качеством.

Список литературы

1. *Судзуки К.* Аморфные металлы / К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото – М. : Металлургия, 1987. – 328 с.

2. Аморфные металлические сплавы : пер. с англ. / под ред. Ф. Е. Люборского. – М. : Металлургия, 1987. – 584 с.

3. *Polk D. E. , Pampilio, C.C.*, Scripta Met., 7, 1161 (1973)

4. *Рахимянов К. Х.* Магнитные характеристики изделий, выполненных из нанокристаллических и аморфных сплавов / К. Х. Рахимянов, Н. П. Гаар, А. С. Еремина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 2. – С. 8 – 10.

5. Прецизионные сплавы : справ. изд. / под ред. Б. В. Молотилова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1983. – 439 с.

6. *Рахимянов К. Х.* Электроалмазная обработка изделий из аморфных и нанокристаллических сплавов : дис. … канд. техн. наук : спец. 05.03.01 / К. Х. Рахимянов ; Новосиб. гос. техн. ун-т – Новосибирск, 2007. – 185 с.

7. *Рахимянов К. Х.* Влияние температуры отжига на структуру и твердость аморфных и нанокристаллических сплавов / К. Х. Рахимянов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2007. – № 2. – С. 14 – 17.

8. Электрохим. обработка металлов / Под ред. И. И. Мороза. – М.: Машиностроение, 1969.

9. *Рахимянов К. Х.* Поляризационные исследования анодного поведения нанокристаллического сплава 5БДСР при электрохимической размерной обработке/ К. Х. Рахимянов, Н. П. Гаар, А. Б. Шарапов // Современные проблемы в технологии машиностроения: Всерос. науч.-практ. конф., посвященная 100-летию со дня рождения профессора Муханова Ивана Ивановича: сб. тр. – Новосибирск, 2009. – С. 147 – 151.

10. *Rakhimyanov H.M.* Possible ways for intensification of dimensional electrochemical machining (DECM) / H. M. Rakhimyanov, N. P. Gaar // Proceedings of IFOST-2008 – 3rd International Forum on Strategic Technologies. 3rd International Forum on Strategic Technologies, IFOST-2008. Novosibirsk-Tomsk, – 2008. – С. 106 – 107.

11. *Гаар Н.П.* Пути интенсификации электрохимической размерной обработки / Н. П. Гаар, Х. М. Рахимянов // Ползуновский альманах. – 2008. – № 4. – С. – 191 – 192.

12. *Рахимянов Х. М.* Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах / Х. М. Рахимянов, Б. А. Красильников, А. С. Захаров, С. И. Василевская // Механики XXI веку – 2015. – С. 112 – 115.

13. *Рахимянов Х. М.* Способ размерной обработки металлов и сплавов / Х.М. Рахимянов, А. И. Журавлев, Н. П. Гаар, А. А. Локтионов // Патент на изобретение RUS 2451582 07.07.2010.

14. *Рахимянов Х. М.* Оценка механизмов активации процесса электрохимической размерной обработки нержавеющей стали / Х. М. Рахимянов, К. Х. Рахимянов, Н. П. Гаар // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3. – С. 19 – 21.

15. *Рахимянов Х. М.* Интенсификация электрохимической размерной обработки нержавеющей стали лазерным излучением / Х. М. Рахимянов, Н. П, Гаар // Механики XXI веку. – 2008. – С. 200 – 202

16. *Рахимянов Х. М.* Анодное поведение стали 12Х18Н9Т в водном растворе хлорида натрия при активации процесса электрохимического растворения лазерным излучением / Х. М. Рахимянов, Б. А. Красильников, Н. П. Гаар // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2010. – №2. – С. – 123 – 128.

17. *Рахимянов Х. М.* Анодное поведение титанового сплава марки ОТ-4 при интенсификации лазерным излучением процесса электрохимического растворения / Х. М. Рахимянов, К. Х. Рахимянов, А. И. Журавлев, Н. П. Гаар и др. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 2. – С. 11 – 13.

18. *Рахимянов Х. М.* Электрохимическая обработка твердого сплава ВК8 в условиях лазерного воздействия длинной волны 1,06 мкм в хлориде натрия / Х.М. Рахимянов, Н. П. Гаар // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 9-й Всерос. науч.-практ. конф., – 2011. – С. 77 – 79.

19. *Рахимянов Х. М.* Лазерно-электрохимическая обработка с применением комбинации спектров излучения / Х. М. Рахимянов, Б. А. Красильников, Н. П. Гаар, А. И. Журавлев и др. // Ползуновский альманах. – 2012. – № 1. – С. – 97 – 98.

20. *Рахимянов Х. М.* Методика выбора электролита для лазерно-электрохимической обработки / Х. М. Рахимянов, Б. А. Красильников, Н. П. Гаар, А. И. Журавлев и др // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 2. – С. 18 – 21.

21. *Рахимянов Х. М.* Электрохимическое растворение титанового сплава ОТ-4 в условиях лазерного воздействия / Х. М. Рахимянов, Б. А. Красильников, Н. П. Гаар, А. И. Журавлев и др. // Инновации в машиностр – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Часть 2 / под ред. А.Г. Суслова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – С. 86 – 90.

22. *Рахимянов Х. М.* Установка для исследования материалов в условиях лазерно-электрохимической обработки комбинированным излучением / Х. М. Рахимянов, Б. А. Красильников, Н. П. Гаар, А. И. Журавлев и др // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3. – С. 30 – 32.

23. *Рахимянов Х. М.* Установка для исследования электрохимических процессов в условиях лазерной активации процесса электрохимической размерной обработки / Х. М. Рахимянов, А. И. Журавлев, Н. П. Гаар // Научный вестник НГТУ, 2010. - № 2. – С. 135 – 144.

24. *Рахимянов Х. М.* Активация анодного растворения аморфных и нанокристаллич. сплавов непрерывным обновлением поверхности / Х. М. Рахимянов, К. Х. Рахимянов, Н. П. Гаар // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 1. – С. 35 – 38.

25. *Рахимянов Х. М.* Влияние режимов обработки на производ. электроалмазного шлифования нанокристаллич. и аморфных сплавов / Х. М. Рахимянов, К. Х. Рахимянов // Научный вестник НГТУ, 2010. - № 1 (38). – С. 99 – 110.

26. *Рахимянов К. Х.* Электроалмазная обработка аморфных и нанокристаллических сплавов / К. Х. Рахимянов // Механики XXI веку. – 2008. – С. 205 – 209.

27. *Черепанов Ю. П.* Электрохим. обработка в машиностроении / Ю. П. Черепанов, Б. И. Самецкий. – М. : Машиностроение, 1972. – 117 с.

28. *Кедров С. М.* Обычное и электромеханическое шлифование твердых сплавов алмазными кругами на металлической связке / С. М. Кедров // Обработка машиностроительных материалов алмазным инструментом. – М. : Наука, 1966. – С. 100–107.

29. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств : монография / А. С. Янюшкин, С. О. Сафонов, В. А. Торопов, Ю. Н. Стебеньков, Н. Р. Лосева, Т. Т. Ереско, А. Н. Баранов, Д. В. Лобанов, В. Ю. Попов, А. А. Сурьев, С. А. Якимов, А. Б. Лосев, Б. В. Федоров. – Братск : ГОУ ВПО «БрГУ», 2006. – 302 с.

30. *Рахимянов Х. М.* Точность формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристал. сплавах / Х. М. Рахимянов, Б. А. Красильников, К. Х. Рахимянов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 2. – С. 32 – 33.

31. *Рахимянов Х. М.* Модернизация оборудования для электроалмазного шлифования изделий из аморфных и нанокристаллических сплавов / Х. М. Рахимянов, Б. А. Красильников, К. Х. Рахимянов, А. С. Еремина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3. – С. 37 – 39.

TECHNOLOGICAL PROCESSING FEATURES PRODUCTS MADE FROM AMORPHOUS AND NANOCRYSTALLINE ALLOYS

Rakhimyanov Kh.M. D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru
Krasilnikov B.A. C.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: _167bak@ngs.ru
Rakhimyanov K.Kh. C.Sc. (Engineering), Associate Professor,
e-mail: backtof79@mail.ru

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

Abstract: The article describes the features of amorphous and nanocrystalline alloys as construction materials. The specificity of the products of this class of alloys and revealed their limitations in machining. Proposed dimensional treatment of products carried out using electrochemical machining. Given the current limitations associated with the formation of oxide films of chemical elements that make up the amorphous and nanocrystalline alloys, the possible mechanisms of intensification of electrochemical dissolution of the processed material. Taking into account the necessary volumes of material to be removed, the possibility of technical realization is proposed to use mechanical intensification electrochemical machining, is to continually upgrade the anode surface. Choose the method of mechanical intensification – electrodiamond processing and installed optimum treatment regimens that provide the technological solution of the problem of cutting through the iron of the stator slots made of nanocrystalline alloy.

Keywords: amorphous and nanocrystalline alloys, electrochemical machining, laser intensification, electrodiamond grinding.

УДК 621.9.047

ИССЛЕДОВАНИЕ АНОДНОГО ПОВЕДЕНИЯ МЕДИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ГИДРОСТРУЙНОЙ АКТИВАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

Х. М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор,
Б. А. КРАСИЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, профессор,
С.И. ВАСИЛЕВСКАЯ, аспирант
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)

Рахимянов Х.М. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: kharis51@mail.ru; _167bak@ngs.ru;
Svetlana.vasilevskaya.87@mail.ru

Аннотация: Статья посвящена исследованию анодного поведения меди в условиях электрохимической обработки при гидроструйной активации поверхности. В статье рассмотрен процесс гидродинамического воздействия струи электролита на электрохимическое растворение поверхности материала в 5 % водном нейтральном пассивирующем электролите хлорида калия (5% KCl). Выявлено, что процесс активации поверхности существенно зависит от скорости струи электролита. Определен диапазон потенциалов, позволяющий реализовать анодное растворение меди при данном методе активации поверхности.

Ключевые слова: анод, растворение, медь, нейтральный электролит, потенциал, плотность тока.

1. Введение

Значимое место в современном машиностроении занимает электрохимическая обработка (ЭХО) металлов, при этом идет поиск новых областей ее реализации [1]. ЭХО это способ обработки, заключающийся в изменении формы и размеров заготовки вследствие анодного растворения ее материала в электролите под действием электрического тока. ЭХО во многих случаях имеет существенные достоинства, так как позволяет обрабатывать детали сложной конфигурации из металлов и сплавов, которые механически или вообще не могут быть обработаны, или обрабатываются с большим трудом. Применяя данный вид обработки возможно достичь высоких показателей качества обрабатываемой поверхности детали, точности и производительности [2, 3].

Известно [4], что для разработки технологии ЭХО металлов необходимо изучение процессов, происходящих на поверхности анода. Одной из особенностей протекания анодных процессов при ЭХО является наличие пассивации обрабатываемого металла, при которой резко падает скорость его растворения. В связи с этим эффективность процесса обработки изделия снижается.

Для повышения эффективности процессов электрохимического растворения существует ряд методов его активации лазерный, механический, тепловой, гидроструйный [5 – 16].

Обобщению путей интенсификации ЭХО посвящены работы [5, 6], а оценка механизмов активации электрохимической обработки нержавеющей стали лазерным излучением дана в исследованиях [7, 8].

Влияние механического обновления анодной поверхности при электрохимической размерной обработке на скорость растворения различных материалов (цветных металлов, инструментальных сталей, аморфных и нанокристаллических сплавов) показано в исследованиях авторов [9 – 11].

Для выявления механизмов активации ЭХО лазерным излучением, в том числе и при использовании комбинированных спектров, были разработаны экспериментальные установки, конструкция которых описана в работах [12,13]. Наряду с экспериментальными исследованиями для промышленной реализации ЭХО в условиях механического обновления обрабатываемой поверхности (электроалмазного шлифования) было разработано и изготовлено специализированное промышленное оборудование [14, 15].

Попытка использования давления струи электролита для снятия ограничений, связанных с образованием оксидных пленок на поверхности меди, выполнена в исследованиях [16].

Гидродинамика электролита в межэлектродном промежутке – один из важных факторов, определяющих результат ЭХО. Корректный подход к проблеме учета

гидродинамических условий обработки является основной задачей в теории ЭХО. В связи с этим гидродинамический метод активации ЭХО не утратил своей актуальности и в настоящее время.

Метод электрохимической гидроструйной активации основан на анодном растворении металла и удалении продуктов реакции из рабочей зоны струей электролита под давлением. При этом количество продуктов электрохимической реакции будет зависеть от скорости анодного растворения материалов и скорости их выноса из рабочей зоны. Данный метод активации основан на процессе ударного воздействия на обрабатываемую поверхность высокоскоростной струи, что приводит к активированию поверхности обрабатываемого материала в зоне воздействия струи.

Настоящая работа посвящена исследованию анодного поведения меди в условиях ЭХО при гидроструйной активации поверхности обрабатываемого материала.

2. Методика экспериментального исследования

Основным методом изучения для оценки анодного поведения обрабатываемого материала являются поляризационные исследования, заключающиеся в определении зависимости плотности тока от потенциала. В качестве обрабатываемого материала в исследованиях использована медь марки М1 ГОСТ 859 - 2001. Объяснение выбору материала представлено авторами работ [9,17].

Для проведения экспериментов применялся 5% водный нейтральный пассивирующий электролит – хлорид калия [16]. Перед каждым экспериментом исследуемую поверхность образца подготавливали согласно методике, описанной в работе [9]. Исследование анодного поведения меди в условиях ЭХО при гидроструйной активации поверхности обрабатываемого материала осуществлялось в диапазоне потенциалов от 0 до 8 В при различных скоростях струи электролита.

Поляризационные исследования проводились на экспериментальной установке, общий вид которой показан на рис. 1. Установка включала в себя экспериментальную ячейку, шар – баллон, компрессор, бачок для слива электролита, систему трубопроводов подачи электролита и воздуха, потенциостат модели П – 5827 М и прибор для регистрации тока. Схема трехэлектродной электрохимической ячейки, состоящей из корпуса ячейки (1), электрода – сравнения (2), катода (3), исследуемого образца (4) представлена на рис. 2.



Рисунок 1. - Экспериментальная установка для исследования анодного растворения материала при электрохимической гидроструйной активации

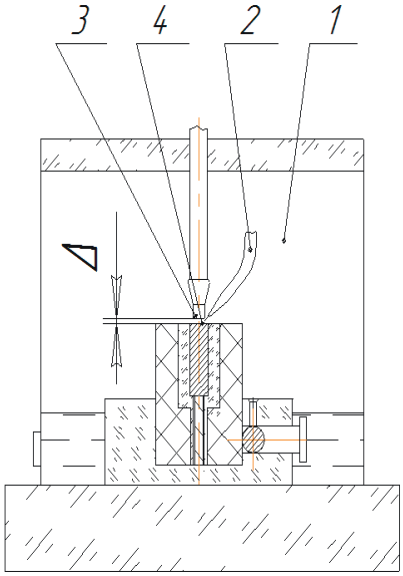


Рисунок 2 - Трехэлектродная электрохимическая ячейка ($\Delta = 0{,}25 d_K$)

Предлагаемый метод активации поверхности материала реализуется следующим образом: струя жидкости под давлением по каналу катода (3) попадает на поверхность исследуемого образца (4). Для реализации подачи струи жидкости от компрессора через трубку подается сжатый воздух с заданным давлением в шар – баллон, в который предварительно заливается электролит. Жидкость из шара – баллона под давлением воздуха попадает через канал катода на обрабатываемую поверхность.

3. Результаты и обсуждения

При исследовании анодного растворения меди в условиях ЭХО при гидроструйной активации обрабатываемой поверхности получены поляризационные зависимости при различных скоростях струи электролита рис. 3 (кривая 1, 2, 3, 4).

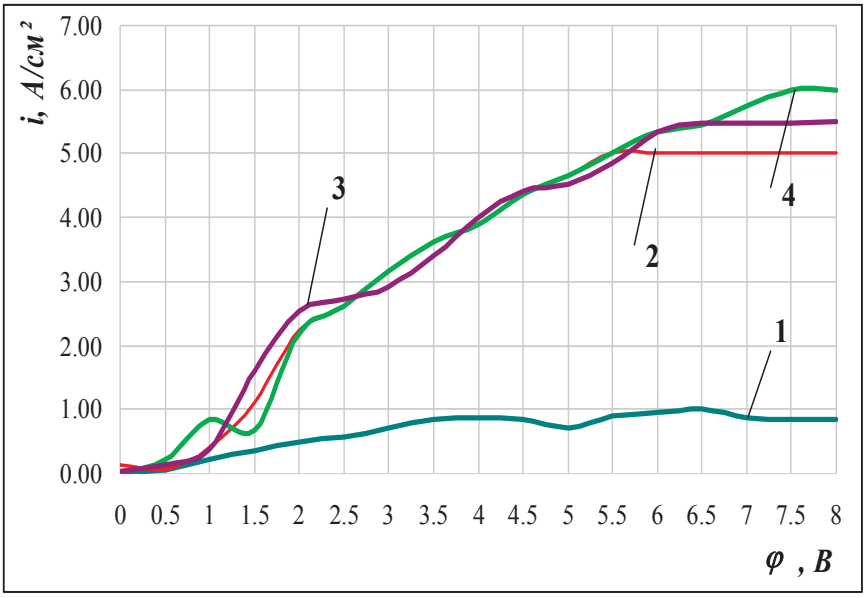


Рисунок 3 - Поляризационные зависимости анодного растворения меди в условиях ЭХО при гидроструйной активации обрабатываемой поверхности при различных скоростях струи электролита (1-9 $м/с$; 2-14 $м/с$; 3-16 $м/с$; 4-24 $м/с$)

Диапазон скоростей струи электролита варьировался от 9 $м/с$ до 24 $м/с$. Для скоростей указанных на рис. 3 определены силы давления струи электролита (F) по формуле 1

$$F = \rho \times S \times V^2, \text{ Н}, \quad (1)$$

где:

ρ - плотность электролита, $кг/м^3$;

S - площадь сечения катода, $м^2$;

V - скорость струи электролита, $м/с$

Расчетные параметры течения струи электролита приведены в таблице.

Из рис. 3 видно, что растворение обрабатываемого материала в диапазоне потенциалов от 0 до 8 В осуществляется в активном состоянии, о чем свидетельствует непрерывное увеличение плотности тока с ростом потенциала.

При этом интенсивность роста плотности тока различна при разных значениях скорости струи электролита.

Таблица 1 - Параметры течения струи электролита

Скорость струи электролита V, $м/с$	Сила давления струи F, $Н$
9	0,0047
14	0,0105
16	0,0131
24	0,0295

Если на минимальной в исследованном диапазоне скорости равной 9 $м/с$ максимальное значение плотности тока достигает 1,0 $А/см^2$, то при повышении скорости течения струи до 14 $м/с$ происходит значительный рост плотности тока, достигающий 5 $А/см^2$. Дальнейшее увеличение скорости приводит к незначительной активации анодного растворения.

Об активации электрохимического растворения свидетельствует изменение глубины лунки на обрабатываемой поверхности с увеличением скорости течения струи электролита.

Так на обрабатываемой поверхности формируются лунки глубиной ($l = 0{,}26$ $мм$) при скорости струи электролита (V = 24 $м/с$). При скоростях от 14 $м/с$ до 16 $м/с$ глубина составляет ($l = 0{,}18$ $мм$) (рис. 4). При низкой

скорости струи электролита ($V = 9$ $м/с$) осуществляется травление по всей поверхности образца, это приводит к незначительному формированию лунок по глубине (рис. 5).

Это свидетельствует о том, что при увеличении скорости струи электролита выше 14 $м/с$ и, соответственно, силы давления струи превышающей 0,0105 $Н$ происходит существенная интенсификация процесса анодного растворения. Это свидетельствует о том, что данных гидродинамических условий достаточно для снятия ограничений, связанных с образованием пассивирующих пленок, образующихся в результате электрохимических реакций. При минимальной гидродинамике истечения струи ее давление для удаления пассивирующих пленок оказывается недостаточно. Об этом свидетельствует как значения достигаемых плотностей тока, так и производительность процесса.

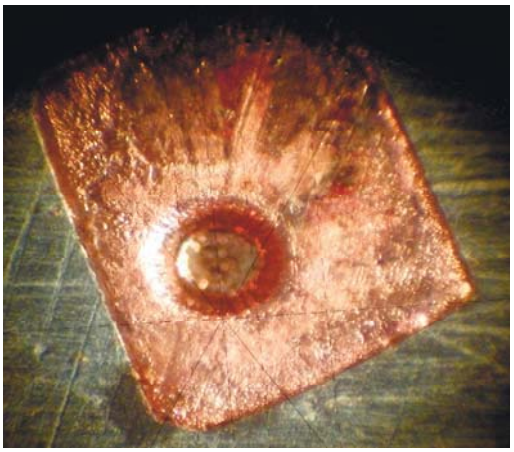


Рисунок 4 - Лунка полученная при $V = 24$ $м/с$, $l = 0{,}26$ $мм$

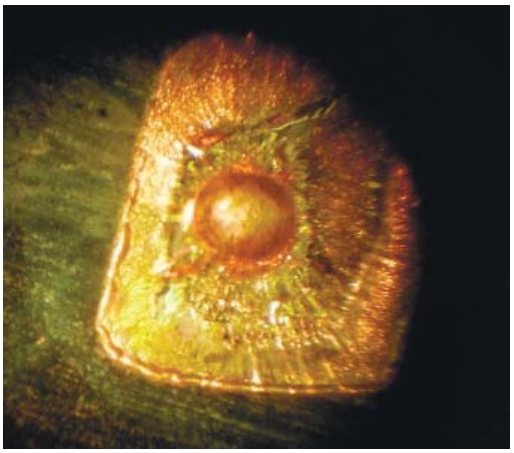


Рисунок 5 - Лунка полученная при $V = 9$ $м/с$, $l = 0{,}05$ $мм$

4. Выводы

Проверенные исследования позволили выявить характер анодного растворения меди в условиях ЭХО при гидроструйной активации поверхности материала в 5 % водном нейтральном пассивирующем электролите хлорида калия (5 % KCl). Во всем исследованном диапазоне потенциалов происходит активация поверхности материала. Выявлено, что при увеличении скорости струи электролита (V) повышается сила давления струи (F) и наблюдается рост плотностей токов. Установлена скорость струи электролита ($V = 24$ $м/с$), при которой осуществляется анодное растворение меди с максимальной плотностью тока 6,0 $А/см^2$.

Список литературы

1. *Попилов Д.Я.* Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник – 2 – е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.

2. *Рахимянов Х.М., Янпольский В.В.* Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах // Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск, 2003. - № 4. – С. 141 – 147.

3. *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.

4. *Мороз И.И.* Электрохимическая обработка металлов. – М.: «Машиностроение», 1969. – 208 с.

5. *Рахимянов Х.М., Гаар Н.П.* Пути интенсификации электрохимической размерной обработки // Ползуновский альманах. 2008. - № 4. – С. 191 – 192.

6. *Rakhimyanov H.M., Gaar N.P.* Possible ways for intensification of dimensional electrochemical machining (DECM) // в сборнике: Proceedings of IFOST – 2008 – 3 rd International Forum on Strategic Technologies. 3 rd International Forum on Strategic Technologies, IFOST – 2008, Novosibirsk – Tomsk, 2008. С. 106 – 107.

7. *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.

8. *Рахимянов Х.М., Гаар Н.П.* Интенсификация электрохимической размерной обработки нержавеющей стали лазерным излучением // Механики XXI веку. 2008. – С. 149 – 152.

9. *Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И.* Исследование электролитов, обеспечивающих точность электрохимической обработки меди М1 // инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI международной научно – технической конференции. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 100 – 104.

10. *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.

11. *Рахимянов Х.М., Рахимянов К.Х., Гаар Н.П.* Активация анодного растворения аморфных и нанокристаллических сплавов непрерывным обновлением поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2010. - № 1. – С. 35 – 38.

12. *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.

13. *Рахимянов Х.М. Журавлев А.И. Гаар* Н.П. Установка для исследования электрохимических процессов в условиях лазерной активации процесса электрохимической размерной обработки // Научный вестник Новосибирского государственного университета. 2010. - № 2. - С. 135 – 144.

14. *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.

15. *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.

16. *Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Захаров А.С., Василевская С.И.* Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах // Механики XXI веку. 2015. - № 14. – С. 112-115.

17. *Василевская С.И., Герасимов Н.В.* Исследование анодного поведения меди в условиях электрохимической обработки // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 16 Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию Победы Великой Отечественной войне (Новосибирск, 22–24 апр. 2015 г.). – Новосибирск, 2015. – С. 178 – 182.

INVESTIGATION OF THE ANODE BEHAVIOUR OF COPPER UNDER CONDITION OF ELECTROCHEMICAL PROCESSING AT HYDROJET ACTIVATION OF THE SURFACE

Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: kharis51@mail.ru
Krasilnikov B. A., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: _167bak@ngs.ru
Vasilevskaya S. I., PhD student, e – mail: Svetlana.vasilevskaya.87@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract: The article investigates the anodic behavior of copper under the conditions of the electrochemical processing by hydrajetting surface activation. The article describes the process of hydrodynamic effect of jets of electrolyte on electrochemical dissolution of the surface material in a 5% aqueous neutral passivating electrolyte of potassium chloride (5% KCl). It was revealed that the process of the surface activating depends essentially on the velocity of the jet of electrolyte. The range of potential to realize the anodic dissolution of copper in this method of surface activation determined.

Keywords: anode dissolution copper, neutral electrolyte, potential current density.

УДК 621.9.047

ОСОБЕННОСТИ АНОДНОГО РАСТВОРЕНИЯ СПЛАВА ЖС6 В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКИ

Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор,
Б. А. КРАСИЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, профессор,
С.И. ВАСИЛЕВСКАЯ, аспирант
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)

Рахимянов Х.М. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: kharis51@mail.ru; _167bak@ngs.ru;
Svetlana.vasilevskaya.87@mail.ru

Аннотация: Статья посвящена изучению анодного растворения сплава ЖС6 в условиях электроалмазной обработки. Выявлено анодное поведение сплава ЖС6 в электролитах на водной и органической основах. В статье рассмотрен процесс электрохимикомеханического воздействия на электрохимическое растворение сплава при электроалмазной обработке. Установлено, что глубинное электроалмазное шлифование является высокоэффективным методом обработки сплава ЖС6 при съеме больших припусков. Определена максимальная производительность при которой осуществляется обработка сплава ЖС6.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, плотность анодного тока, потенциал, производительность, электроалмазное шлифование, сплав ЖС6, электродные процессы, электролиты на водных и органических основах.

1. Введение

Процесс электрохимической обработки (ЭХО) – один из наиболее эффективных методов обработки труднообрабатываемых материалов. Авторами работ [1-7] проведены исследования по выявлению закономерностей и возможности применения этого метода в условиях интенсификации процессов анодного растворения материалов таких как инструментальные стали, аморфные и нанокристаллические сплавы, безвольфрамовые твердые сплавы, цветные металлы.

Для разработки технологии ЭХО металлов и сплавов необходимо изучение процессов происходящих на поверхности анода. Существует несколько теорий, которые объясняют пассивное и активное состояние поверхности анода при анодном растворении металлов [8].

Теория пленочной пассивации основана на роли кислорода при образовании гидроокисных или фазовых пленок на поверхности обрабатываемого металла или сплава. При растворении металла могут образовываться и солевые пленки, которые также приводят к процессу пассивации.

На кинетику электродных процессов существенное влияние оказывает адсорбция органических веществ на поверхности анода. Так органические вещества могут приводить к ингибированию электродных процессов за счет пассивации анодного растворения.

На результаты ЭХО существенное влияние оказывает и тип применяемого электролита. Возможность использования органических электролитов для обработки твердого сплава описана в работе [9]. В настоящее время использование органических электролитов вызывает наибольший интерес для обработки жаропрочных сплавов в условиях ЭХО. Поэтому целью работы является исследование растворения сплава ЖС6 в различных электролитах на водной и органической основах в стационарных условиях и при обновлении поверхности.

2. Методика экспериментального исследования

Исследования электрохимического поведения сплава ЖС6 проводились на потенциостате модели П – 5827 М с автоматической записью тока, работавшем в потенциодинамическом режиме. Скорость изменения потенциала составляла 2 $\text{В}/\text{мин}$.

Рабочим электродом служил торец образца из сплава ЖС6, нерабочая поверхность которого изолировалась эпоксидной смолой. Перед каждым экспериментом поверхность рабочего электрода обновлялась и подготавливалась следующим образом: шлифование электрода на наждачной бумаге (величина зерна не более 3 мкм); обезжиривание поверхности ацетоном и промывание ее в дистиллированной воде. Электродом сравнения служил стандартный

хлорсеребряный электрод марки ЭВЛ-1М1. В качестве вспомогательного электрода использовался платиновый электрод.

Регистрация тока поляризации осуществлялась миллиамперметром модели М 1104. Кислотность растворов электролитов измерялась иономером универсальным модели эВ – 74, а температура их – ртутным термометром.

Все электролиты готовились из реактивов марки ХЧ. Исследованные электролиты и их состав, равновесный потенциал и кислотность приведены в таблице.

Таблица 1 - Равновесные потенциалы и кислотность исследованных электролитов

Состав электролита, %	Равновесный потенциал, φ_P	Кислотность, pH
5 % NaOH в воде		11,4
10% NaOH в воде		12,6
5 % KOH в воде		13,2
10 % KOH в воде		13,4
1, 64 % H_3PO_4 в воде	-0,19	-0,1
HCl (к)	-0,19	-0,6
H_2SO_4 (к)	-0,05	-1
HNO_3 (к)	+1	0,4
5 % NaCl в воде	-0,41	7,2
10 % NaCl в воде	-0,45	7,8
5 % Na_2SO_4 в воде	-0,33	6,6
10 % Na_2SO_4 в воде	-0,195	7,2
22 % LiCl в изопропиловом спирте	-0,37	2,6
46 % LiCl в глицерине	-0,32	3,4
4 % LiCl в диметилформамиде	-0,36	6,1
2 % LiCl в ацетоне	-0,29	3,1
10 % $NaNO_3$ в этиленгликоле	-0,41	3,5
4 % $NaNO_3$ в глицерине	-0,26	3,2
6, 25 % $LiNO_3$ в метилэтилкетоне	+0,9	0,9
44 % $LiNO_3$ в изопропиловом спирте	-0,24	2,8
26, 5 % $LiNO_3$ в диметилформамиде	+0,13	6,1
13,8 % $NaNO_3$ в диметилформамиде	+0,1	7,4

Состав электролита оказывает решающее влияние на закономерности анодного поведения металлов и сплавов. Исследования проводились общепринятым в электрохимической кинетике методом – по зависимости тока от потенциала анода, графическая интерпретация, которой представляет поляризационную кривую. Кривые анодной поляризации дают внешнее, но достаточно полное представление о характере анодных процессов, являясь необходимым этапом исследования.

С целью определения возможности обработки жаропрочного сплава ЖС6 был проведен следующий эксперимент при электрохимикомеханическом воздействии.

Эксперимент проводился на модернизированном плоскошлифовальном станке модели 3Г71М. Применялся алмазный круг прямого профиля АПП 250х76х15, АСВ 125/100, М1. Использовался 15% электролит азотнокислого натрия. В процессе эксперимента варьировались следующие факторы:

- глубина обработки - 1, 2, 3 мм;
- напряжение технологического тока - 6, 9, 12 В;
- статическое усилие подачи детали составляло - 10, 15, 20 кГ.

Производительность обработки определялась по формуле

$$\theta = P/t, \left[\frac{\text{г}}{\text{мин}}\right]$$

где

P - вес снятого материала, г;

t - время шлифования поверхности, мин.

Вес снятого материала регистрировался как разность между весом образца до и после обработки. Взвешивание производилось на аналитических весах АДВ – 200 М с точностью

до 1 мг. Время обработки регистрировалось секундомером с точностью до 0,1 секунды. В процессе эксперимента регистрировалась величина технологического тока в межэлектродном промежутке (МЭП).

3. Результаты и обсуждения

Кривые анодной поляризации снимались в диапазоне потенциалов от 0 до 8 В. Зависимости $i = f(\varphi)$ при обработке в ряде растворов характеризуются наличием максимумов и минимумов, в некоторых же электролитах эта зависимость имеет непрерывно восходящий или нисходящий характер. В связи с этим появляется возможность разделения исследуемых растворов электролитов на группы по виду поляризационных кривых. При анализе последних выявлено три группы электролитов:

- электролиты, где значения поляризуемости сплавов $\Delta i_a / \Delta \varphi_a$ принимают как положительные, так и отрицательные значения;
- электролиты, в которых поляризуемость сплавов $\Delta i_a / \Delta \varphi_a$ во всем интервале потенциалов принимает только положительные значения;
- электролиты, в которых поляризуемость сплавов $\Delta i_a / \Delta \varphi_a$ во всем интервале принимает только отрицательные значения.

К первой группе относятся: часть водных электролитов – соляная кислота, азотная кислота, хлористый натрий; часть электролитов на органической основе – азотнокислый натрий в этиленгликоле, азотнокислый натрий в диметилформамиде, хлористый литий в глицерине.

Ко второй группе электролитов относятся: следующие водные электролиты – серная кислота, фосфорная кислота, гидроокись калия, гидроокись натрия, сернокислый натрий, азотнокислый натрий; неводные – хлористый литий в диметилформамиде, азотнокислый литий в метилэтилкетоне, азотнокислый литий в изопропиловом спирте.

Электролитов третьей группы для сплава ЖС6 среди исследуемых не установлено. Исходя из проведенных исследований, можно рекомендовать для обработки сплава ЖС6 электролиты второй группы.

Перспективность применения органических растворов для обработки сплава ЖС6 объясняется возможностью исключения ряда недостатков, свойственных водным электролитам. В связи с этим для реализации обработки в промышленных условиях рекомендуются следующие электролиты – хлористый литий в диметилформамиде, азотнокислый литий в метилэтилкетоне, азотнокислый литий в изопропиловом спирте.

Исследование обрабатываемости сплавов при одновременном электрохимикомеханическим воздействии электролитов показывает возможность резкого увеличения съема припуска [2, 4-5]. Одним из представителей данного класса обработки является глубинное электроалмазное шлифование.

На рис. 1 – 3 показаны зависимости производительности шлифования от усилия подачи при разной глубине обработки и напряжения технологического тока.

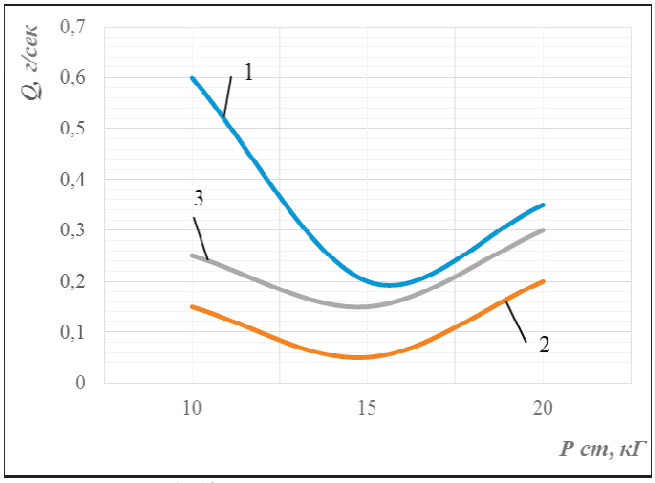


Рисунок. 1 - Зависимости производительности шлифования от усилия подачи при глубине обработки t = 1 мм (1-12В; 2-9В; 3-6В)

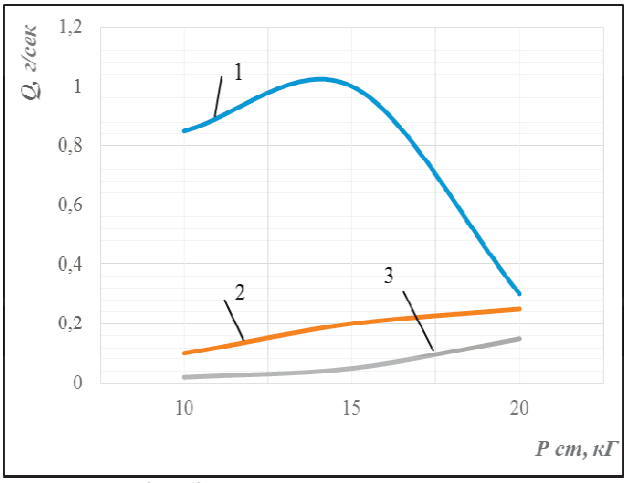


Рисунок 2. - Зависимости производительности шлифования от усилия подачи при глубине обработки t = 2 мм (1-12В; 2-9В; 3-6В)

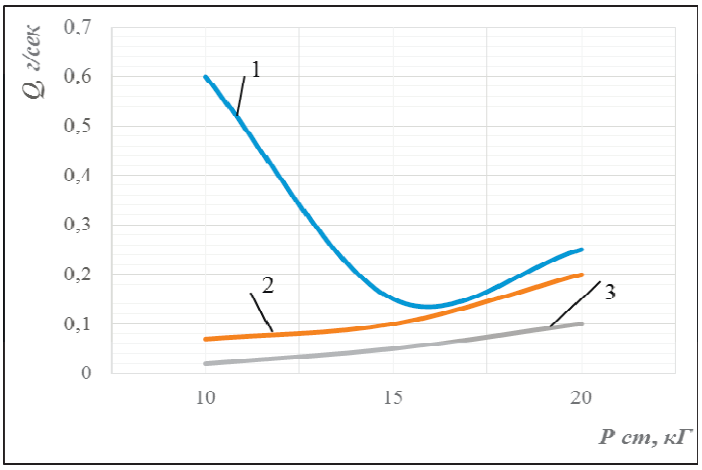


Рисунок 3. - Зависимости производительности шлифования от усилия подачи при глубине обработки t = 3 мм (1-12В; 2-9В; 3-6В)

Проведенные исследования позволили установить, что производительность процесса электроалмазного шлифования зависит от напряжения технологического тока, усилия прижима детали к инструменту и глубины обработки. Увеличение напряжения с 6 до 12 В приводит к увеличению съема за счет улучшения процесса обновления анодной поверхности алмазными зернами и интенсификации электрохимического растворения металла.

Повышение статического усилия приводит к увеличению съема при напряжениях 6 и 9 В при всех исследованных глубинах резания. Это связано как с повышением плотности тока и, следовательно, усилением анодного растворении, так и с увеличением механического съема. При напряжении 12 В максимальная производительность равна 1 $\text{г}/\text{с}$, что соответствует 7000 $\text{мм}^3/\text{мин}$ наблюдается при глубине резания 2 мм и статическом усилии 15 кГ. Дальнейшее повышение усилия приводит к уменьшению съема материала, за счет возникновения электроэрозионных процессов, разрушающих алмазные зерна.

4. Выводы

Установлено, что глубинное электроалмазное шлифование является высокоэффективным методом обработки сплава ЖС6 при съеме больших припусков.

Определена максимальная производительность 7000 $\text{мм}^3/\text{мин}$ при которой осуществляется обработка сплава ЖС 6 с глубиной шлифования (t = 2 мм) при напряжении технологического тока (U = 12 В) и статическом усилии подачи детали 15 кГ.

Список литературы

1. 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.

2. *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.

3. *Рахимянов Х.М., Рахимянов К.Х., Гаар Н.П.* Активация анодного растворения аморфных и нанокристаллических сплавов непрерывным обновлением поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2010. - № 1. – С. 35 – 38.

4. *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.

5. *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.

6. *Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Захаров А.С., Василевская С.И.* Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах // Механики XXI веку. 2015. - № 14. – С. 112-115.

7. *Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И.* Исследование электролитов, обеспечивающих точность электрохимической обработки меди М1 // инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI международной научно – технической конференции. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 100 – 104.

8. *Мороз И.И.* Электрохимическая обработка металлов. – М.: «Машиностроение», 1969. – 208 с.

9. *Красильников Б.А.* Анодное поведение твердого сплава ВК 8 в электролитах на органической основе // Современная электротехнология в машиностроении: сборник трудов Международной научно – технической конференции. – Тула, 2002. – С. 140 – 149.

FEATURES OF ANODE DISSOLUTION OF THE ALLOY OF ZHS 6 IN THE CONDITIONS OF ELECTRODIAMOND PROCESSING

Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: kharis51@mail.ru
Krasilnikov B. A., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: _167bak@ngs.ru
Vasilevskaya S. I., PhD student, e – mail: Svetlana.vasilevskaya.87@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to studying of anode dissolution of an alloy of ZhS6 in the conditions of electrodiamond processing. The anode behavior of an alloy of ZhS6 in electrolytes on water and organic bases is revealed. In article process of elektrokhimikomekhanichesky influence on electrochemical dissolution of an alloy at electrodiamond processing is considered. It was found that the depth electrodiamond grinding is a highly effective method of processing the alloy ZhS6 at removing large allowances. The maximum productivity with which processing of an alloy of ZhS6 is carried out is determined.

Keywords: electrochemical machining, anode current density, potential productivity electrodiamond grinding, alloy ZhS6, electrode processes, electrolytes water and organic basics.

УДК 621.9.01; 621.791.947.55

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСКРОЮ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ*

Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор,
А.Х. РАХИМЯНОВ, ассистент
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)

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

Аннотация: В настоящей работе рассмотрены методы создания слоистых металлических композиций. Показаны перспективы использования биметаллических соединений, полученных сваркой взрывом, в качестве конструкционных материалов. Полученные результаты представлены разработкой технологических рекомендаций по тонкоструйной плазменной резке биметаллических композиций «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т», «сталь Ст3 + алюминий А5М», «сталь Ст3 + медь М1», полученных сваркой взрывом. Предложены решения по выбору технологических схем раскроя, в зависимости от материалов в композиции, режимных параметров (тока дуги и скорости реза), определяемых толщиной биметаллического пакета и лобовой стороны раскроя с учетом теплофизических свойств металлов в композиции.

Ключевые слова: тонкоструйная плазменная резка, биметаллические композиции, сварка взрывом, технологические схемы.

Введение

Существующие в настоящее время тенденции в развитии техники, ориентированной на реализацию сложных технических задач в экстремальных условиях эксплуатации, направлены на создание новых классов материалов, обладающих требуемым комплексом свойств. Решение подобной проблемы за счет использования в конструкции детали только одного вида материала не представляется возможным, поскольку, зачастую, к разным объемам материала детали предъявляются различные требования по свойствам. Достижение результата очевидно при создании плакированных материалов, представляющих собой соединение двух и более разнородных по свойствам материалов. Из существующего многообразия технологических методов соединения разнородных материалов, в том числе и листовых композиций, следует выделить технологии, основанные на сварке металлов прокаткой [1] и метании пластин при помощи взрыва [2, 3].

Технология прокатки слоистых композиций заключается в многократном пластическом деформировании предварительно собранного пакета из листовых материалов. Если метод прокатки для обеспечения достаточной прочности соединения требует реализации многократного цикла, приводящего в итоге к 5-7 кратному утонению исходного пакета, в то время как соединение листовых материалов при помощи сварки взрывом осуществляется за один технологический цикл. Специфика сварки взрывом, позволяющая рассматривать ее как технологический метод получения слоистых композиций, заключается в следующем [3]:

1. Возможность создания высокопрочного соединения разнородных металлов, диффузионная сварка и сварка плавлением которых не возможны.
2. Сварка взрывом позволяет получать композиции соединений из металлов с существенно различающимися температурами плавления.
3. Возможность соединения металлов с прочными поверхностными пленками, разрушить которые для создания контакта металлов по ювенильным поверхностям не реально при использовании метода прокатки.
4. Технологический диапазон толщин плакирующего металла при сварке взрывом составляет от 0,03 до 30 мм, что является достаточным для создания различного рода конструкций из слоистых композиций.

Принимая во внимание особенности процесса сварки взрывом разнородных материалов, следует ожидать широкие возможности для

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию № 2014/138, проект № 257.

создания уникальных материалов при конструировании особо сложных и ответственных машин и механизмов.

В тоже время, для промышленного использования композиций, полученных сваркой взрывом, необходим поиск технологических методов их обработки, в том числе и на этапе заготовительного производства. Так как сварка взрывом в основном ориентирована на создание композиций из листовых материалов, то из всего комплекса технологий заготовительного производства наиболее приемлемыми представляются термические методы раскроя.

Анализ возможных технологий термической резки металлических материалов – кислородной, тонкоструйной плазменной и лазерной показывает, что каждая из них обладает определенными преимуществами и недостатками с позиций достигаемой точности, качества и производительности. Сравнение этих технологий по данным оценкам и с учетом эксплуатационных затрат и технического обслуживания компонентов оборудования, выполненное ведущим производителем оборудования для термической резки – фирмой HYPERTHERM (США), указывает на привлекательность технологии тонкоструйной плазменной резки [4]. Данная технология применима для раскроя различных классов металлических материалов в широком диапазоне толщин.

В работах [5-9] изучены технологические особенности тонкоструйной плазменной резки листовых мономатериалов, выполненных из низкоуглеродистой стали Ст3, конструкционной стали 45, нержавеющей стали 12Х18Н10Т, алюминия А5М, меди М1. Авторами обоснован выбор соответствующей материалу и толщине реза технологической схемы раскроя и проведена оптимизация режимных параметров.

Оценке геометрической точности реза и поиску путей ее повышения посвящены работы [10-13]. Особенности формирования шероховатости поверхности реза при данном методе термической резки отражены в результатах, опубликованных в работе [14].

Отдельный цикл работ [15, 16] по совершенствованию технологии тонкоструйной плазменной резки мономатериалов направлен на выявление особенностей износа расходных элементов плазмотрона и на выработку рекомендаций по увеличению срока их службы.

Комплексный анализ погрешностей формообразования и моделирование процесса тонкоструйной плазменной резки для обеспечения точности при обработке криволинейных контуров, представленные в работах [17, 18], подводят теоретическую базу для описания исследуемых процессов.

Отмеченные работы были направлены на исследование и совершенствование тонкоструйной плазменной резки мономатериалов и не дают ответа на возможность ее использования для раскроя различного рода биметаллических композиций.

Учитывая тот факт, что исследуемая технология относится к термическим методам резки, задача изучения тепловых процессов в канале реза является определяющей. Попытка математического моделирования тепловых процессов при тонкоструйной плазменной резке была предпринята в исследованиях работы [19].

Авторами работ [20, 21] представлены результаты исследований по использованию данной технологии для раскроя биметаллических композиций «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т», «сталь Ст3 + медь М1», полученных сваркой взрывом, направленные на выбор требуемой технологической схемы и оптимизацию режимных параметров.

Целью настоящего исследования является разработка технологических рекомендаций по раскрою биметаллических композиций.

Материалы и методы исследования

Для разработки технологических рекомендаций по раскрою биметаллических композиций с помощью тонкоструйной плазменной резки воспользуемся результатами технологических экспериментов, представленных в работах [20, 21]. В качестве образцов служили биметаллические соединения листовых прокатов низкоуглеродистой стали Ст3 (ГОСТ 380-2005) толщиной 3 мм с нержавеющей сталью 12Х18Н10Т (ГОСТ 5582-75) толщиной 2 мм, алюминием А5М (ГОСТ 21631-76) толщиной 3 мм и медью М1 (ГОСТ 495-92) толщиной 2 мм, полученные сваркой взрывом в лаборатории физики взрыва Института Гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск).

Экспериментальные исследования проводились на технологическом комплексе тонкоструйной плазменной резки Hi-Focus 130i, состав и структура которого описаны в работе [22].

Методика выбора технологических схем тонкоструйной плазменной резки той или иной комбинации биметаллического соединения описана в работах [20, 21]. Режимные параметры раскроя (ток дуги и скорость реза) определялись толщиной биметаллического пакета.

Раскрой биметаллического пакета производился с разных его сторон при использовании всех выбранных для исследования технологических схем.

Результаты и обсуждения

Результаты технологических экспериментов по раскрою биметаллических композиций «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т», «сталь Ст3 + алюминий А5М», «сталь Ст3 + медь М1» представлены в таблицах 1, 2, 3, соответственно.

Таблица 1. Результаты технологических экспериментов по тонкоструйной плазменной резке биметаллического пакета «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» толщиной 5 мм

Лобовая сторона раскроя пакета	Технологическая схема, ток дуги (I), скорость реза (V)	Отклонение реза от перпендикулярности на участках		Шероховатость поверхности реза, Ra
		Стали Ст3	Стали 12Х18Н10Т	
Сталь 12Х18Н10Т	Hi-Focus^{plus} на режимах раскроя углеродистых сталей; I=50 А; V=1,65 м/мин	+0,25°	-0,5°	1,34 мкм
	Hi-Focus на режимах раскроя легированных сталей; I=45 А; V=1,15 м/мин	-1,5°	+3,5°	5,8 мкм
Сталь Ст3	Hi-Focus^{plus} на режимах раскроя углеродистых сталей; I=50 А; V=1,5 м/мин	0°	0°	1,28 мкм
	Hi-Focus на режимах раскроя легированных сталей; I=45 А; V=1,3 м/мин	0°	-4°	2,50 мкм

Таблица 2. Результаты технологических экспериментов по тонкоструйной плазменной резке биметаллического пакета «сталь Ст3 + алюминий А5М» толщиной 6 мм

Лобовая сторона раскроя пакета	Технологическая схема, ток дуги (I), скорость реза (V)	Отклонение реза от перпендикулярности на участках		Шероховатость поверхности реза, Ra
		Стали Ст3	Алюминия А5М	
Алюминий А5М	Hi-Focus^{plus} на режимах раскроя углеродистых сталей; I=50 А; V=1,7 м/мин	1,0°	12°	Не поддается оценке. Плохая микрогеометрия
	Hi-Focus на режимах раскроя алюминиевых сплавов; I=50 А; V=1,5 м/мин	Непрорез пакета на всю толщину		
Сталь Ст3	Hi-Focus^{plus} на режимах раскроя углеродистых сталей; I=50 А; V=1,5 м/мин	1,5°	Образование поднутрения с элементами расплава стали	2,5 мкм на участке стали; 12 мкм на участке алюминия
	Hi-Focus на режимах раскроя алюминиевых сплавов; I=50 А; V=1,1 м/мин	2,0°	Образование поднутрения с элементами расплава стали	Не поддается оценке. Плохая микрогеометрия

Таблица 3. Результаты технологических экспериментов по тонкоструйной плазменной резке биметаллического пакета «сталь Ст3 + медь М1» толщиной 5 мм

Лобовая сторона раскроя пакета	Технологическая схема, ток дуги (I), скорость реза (V)	Отклонение реза от перпендикулярности на участках		Шероховатость поверхности реза, Ra
		Стали Ст3	Меди М1	
Медь М1	Hi-Focus^{plus} на режимах раскроя углеродистых сталей; I=50 А; V=1,7 м/мин	4,5°	Расширение канала реза ~ 0,25 мм	Не поддается оценке. Плохая микрогеометрия
Сталь Ст3	Hi-Focus^{plus} на режимах раскроя углеродистых сталей; I=50 А; V=1,5 м/мин	3,3°	Образование наплыва стали ~ 0,15 мм	1,5-2,5 мкм (на участке стали); 3,0-6,0 мкм (на участке меди)

Совокупность полученных результатов позволила сформулировать обобщенные технологические рекомендации по раскрою биметаллических композиций, выполненных из разнородных по теплофизическим свойствам материалов, с использованием тонкоструйной плазменной резки:

1. Набор приемлемых технологических схем по раскрою конкретной биметаллической композиции из существующей композиции должен определяться классами материалов, представленных в композиции.

2. Назначение режимных параметров (вид плазмообразующего и завихряющего газов, их давление и расход, токовый режим, ориентировочный диапазон скоростей обработки) следует осуществлять исходя из толщины пакета биметаллической композиции.

3. При наличии в выборе нескольких технологических схем, что является характерным для обработки в диапазоне малых и средних толщин реза, предпочтение следует отдать схеме с наименьшим значением токового режима, обеспечивающей формирование наименьшей ширины реза, а следовательно, реализующей наилучшие условия для удаления продуктов расплава, обеспечивая благоприятную морфологию поверхности реза и минимизируя гратообразование на его кромках.

4. Если в биметаллической композиции имеет место преобладание одного из материалов по толщине, то выбор технологической схемы должен быть ориентирован на этот материал и раскрой композиции необходимо проводить с его стороны.

5. При сопоставимости толщин материалов, составляющих биметаллическую композицию, технологическая схема раскроя должна соответствовать материалу с наименьшей кинематической вязкостью расплава и наименьшей склонностью к образованию тугоплавких химических соединений элементов расплава с газовой средой в канале реза.

6. При выборе лобовой стороны раскроя биметаллической композиции необходимо иметь в виду, то, что материал с повышенной вязкостью расплава должен находиться в нижней части пакета.

7. Для биметаллических композиций материалов, обладающих существенной разницей в температурах плавления характерно расширение канала реза, если материал с минимальной температурой плавления находиться в нижней части пакета.

8. Выбор в качестве лобовой стороны материала с высокой теплопроводностью приведет к формированию реза со значительным отклонением от перпендикулярности на его участке. Смена лобовой стороны позволит повысить точность реза на участке материала с высокой теплопроводностью, но возможно осаждение на нем элементов расплава с верхнего участка.

9. При назначении режимных параметров раскроя биметаллической композиции с материалом с высокой теплопроводностью в верхней части пакета скорость раскроя следует назначать ближе к нижней границе рекомендованного диапазона. В противном случае возникает опасность непрореза пакета на всю толщину.

10. Для исключения образования дефектов на поверхности реза и гратообразования на его нижних кромках при раскрое биметаллических композиций, в состав которых входят материалы, склонные к образованию нитридов и оксидов в процессе резки, следует выбирать технологические схемы с инертными газами в качестве плазмообразующих и завихряющих.

11. Для эффективного удаления продуктов расплава из канала реза для обработки композиций, составляющими которой являются материалы с повышенной кинематической вязкостью, следует рекомендовать технологические схемы с максимальными значениями давлений и расходов плазмообразующего и завихряющего газов.

Выводы

По результатам технологических экспериментов по раскрою биметаллических композиций «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т», «сталь Ст3 + алюминий А5М», «сталь Ст3 + медь М1» разработаны технологические рекомендации по выбору технологических схем раскроя, назначению режимных параметров, выбору лобовой стороны реза для достижения лучших показателей точности и качества реза и исключению дефектов с учетом геометрических размеров составляющих элементов пакета и их теплофизических свойств.

Список литературы

1. *Суханов Д.А.* Повышение конструктивной прочности сталей формированием тонкодисперсной слоистой структуры: дис. канд. техн. наук / Д.А. Суханов. – Новосибирск, 2002. – 198 с.

2. *Дерибас А.А.* Физика упрочнения и сварки взрывом / А.А. Дерибас; отв. ред. С.С. Григорян. – 2-е изд., доп. и перераб. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.

3. *Захаренко И.Д.* Сварка металлов взрывом / И.Д. Захаренко; АН БССР, Витеб. отд-ние Ин-та физики твердого тела и полупроводников. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 205 с.с.

4. www. hypertherm.com

5. *Рахимянов К.Х.* Исследование обрабатываемости стали Ст3 методом тонкоструйной плазменной резки / К.Х. Рахимянов, А.Х. Рахимянов, С.В. Шопф // Ползуновский альманах. – 2012. - № 1. – С. 121 – 124.

6. *Рахимянов А.Х.* Влияние режимов тонкоструйной плазменной резки на качество обработки нержавеющей стали 12Х18Н10Т / А.Х. Рахимянов, Х.М. Рахимянов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Часть 2 / под ред. А.Г. Суслова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – С. 78 – 85.

7. *Рахимянов А.Х.* Технологические особенности плазменного раскроя алюминиевых сплавов / А.Х. Рахимянов, Б.А. Красильников // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Ч2 / под ред. А.Г. Суслова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – С. 71 – 77.

8. *Рахимянов А.Х.* Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов / А.Х. Рахимянов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Часть 2 / под ред. А.Г. Суслова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – С. 66 – 70.

9. *Рахимянов Х.М.* Исследование обрабатываемости стали 12Х18Н10Т методом тонкоструйной плазменной резки / Х.М. Рахимянов, К.Х. Рахимянов, А.Х. Рахимянов, С.В. Шопф, В.В. Захаров // Инновации в машиностроении: тр. 4 Междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск 2 – 4 окт. 2013 г. - Новосибирск, 2013. – С. 38 – 44.

10. *Рахимянов Х.М.* Оценка геометрической точности реза листовых материалов при различных технологиях тонкоструйной плазменной резки / Х.М. Рахимянов, А.А. Локтионов, Ю.В. Никитин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. № 3 (60). – С. 25 – 30.

11. *Рахимянов Х.М.* Особенности формирования кромок при тонкоструйной плазменной резке листового материала / Х.М. Рахимянов, А.А. Локтионов // Инновации в машиностроении: тр. 2 Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 6 – 8 окт. 2011 г. – Кемерово, 2011. – С. 416 – 419.

12. *Рахимянов Х.М.* Точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов и пути ее повышения / Х.М. Рахимянов, А.А. Локтионов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2009. - № 4 (45). – С. 31 – 32.

13. *Рахимянов Х.М* Повышение точности реза при тонкоструйной плазменной обработке / Х.М. Рахимянов, А.А. Локтионов // Механики XXI веку: сб. докладов VII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Братск, 18 – 20 марта 2008 г. – Братск, 2008. – С. 200 – 202.

14. *Рахимянов Х.М.* Влияние технологий тонкоструйной плазменной резки на формирование шероховатости реза / Х.М. Рахимянов, А.А. Локтионов // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. 7 Междунар. науч.-техн. конф., Томск, 11 – 13 нояб. 2013 г. – Томск, 2013. – С. 349 – 353.

15. *Рахимянов Х.М.* Разновидности катодов, применяемых для плазменной резки, и влияние степени их износа на точность формообразования/ Х.М. Рахимянов, А.А. Локтионов // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 10 Всерос. науч.-практ. конф., 28 марта 2012 г. – Новосибирск, 2012. – С. 68 – 71.

16. *Рахимянов Х.М.* Влияние износа расходных элементов на точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке / Х.М. Рахимянов, А.А. Локтионов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. - № 4. – С. 14 – 18.

17. *Рахимянов Х.М.* Анализ погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов / Х.М. Рахимянов, А.А. Локтионов // Современные проблемы в технологии машиностроения: Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения проф. Муханова Ивана Ивановича: сб. тр. – Новосибирск, 2009. – С. 151 – 153.

18. *Рахимянов Х.М.* Моделирование процессов тонкоструйной плазменной резки для обеспечения точности формирования криволинейных контуров / Х.М. Рахимянов, А.И. Журавлев, А.А. Локтионов, А.Х. Рахимянов // Научный вестник НГТУ, 2009. - № 4 (37). – С. 123 – 134.

19. *Рахимянов Х.М* Моделирование тепловых процессов тонкоструйной плазменной резки / Х.М. Рахимянов, А.Х. Рахимянов, С.В. Лунин // Инновации в машиностроении: тр. 2 Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 6 – 8 окт. 2011 г. – Кемерово, 2011. – С. 161 – 165.

20. *Рахимянов А.Х.* Технологические особенности раскроя биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при тонкоструйной плазменной резке / А.Х. Рахимянов, Х.М. Рахимянов, Б.А. Красильников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014 - № 3 (64). – С. 51 – 67.

21. R*akhmyanov K., Rakhmyanov A., Zhuravlev A*. Advantages of High-Precision Plasma Cutting for Processing Bimetallic Compositions // Applied Mechanics and Materials. - Vol. 698 (2015). pp 294-298.

22. *Рахимянов А.Х.* Выбор технологических схем и оптимизация режимов тонкоструйной плазменной резки конструкционных сталей / А.Х. Рахимянов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. - № 2 (63). – С. 46 – 55.

Technological recommendations for cutting bimetallic compositions using high-precision plasma cutting

Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru
Rakhimyanov A.Kh., Assistant, e-mail: centerfht@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa,
Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract: The methods for creating layered metal compositions in this paper are considered. The prospects of using bimetallic compounds obtained by explosion welding, as structural materials are showed. The results as developed technological recommendations for high-precision plasma cutting bimetallic compositions "steel St3 + steel 12X18H10T", "steel St3 + aluminum A5M", " steel St3 + copper M1" obtained by explosion welding are presented. Solutions optionally technological schemes cutting, depending on the materials in the composition, mode parameters (arc current and cutting speed) determined by the thickness of the bimetallic package and the direction of the cut based thermophysical properties of the metals in the composition are proposed.

Keywords: the high-precision plasma cutting, bimetallic compositions, explosion welding, technological schemes.

УДК 621.789

РОЛЬ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В ФОРМИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ ЦЕМЕНТАЦИИ И ЗАКАЛКИ В ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ПЛАЗМЕ

Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор,
К.Х. РАХИМЯНОВ, канд. техн. наук, доцент,
Ю.С. СЕМЕНОВА, канд. техн. наук, доцент,
А.С. ЕРЕМИНА, ст. преподаватель,
О.Л. ТОВКАЧ, аспирант
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)

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

Аннотация: Исследована возможность использования базовых схем комбинированных высокоинтенсивных термических и деформационных процессов для создания совмещенной обработки химико-термического упрочнения в электролитной плазме и ультразвукового пластического деформирования. На основании анализа принципов совмещения указанных процессов, соблюдения геометрических признаков и температурно-временного критерия их соединения предложено использовать в комбинировании базовую схему III. Экспериментально доказана эффективность данной обработки, обеспечивающей формирование высокопрочного поверхностного слоя на образцах, выполненных из стали 20, размером до 400 мкм, с максимальной твердостью до 10500 МПа и образованием на поверхности регулярного микрорельефа.

Ключевые слова комбинированная обработка, химико-термическая обработка, ультразвуковое пластическое деформирование, электролитная плазма, цементация, закалка, высокопрочный поверхностный слой.

1. Введение

Разработка перспективных технологий, направленных на формирование высококачественного поверхностного слоя деталей машин и инструментов основана на фундаментальном теоретическом и экспериментальном изучении существующих методов упрочнения материалов и принятии оригинальных решений для их совершенствования, в том числе и путем их комбинирования.

2. Теория

Теоретические основы комбинирования высокоинтенсивных термических и деформационных процессов в поверхностной обработке металлов и сплавов разработаны автором работы [1]. Значимость научных результатов данной работы заключается в разработке принципов комбинирования высокоинтенсивных (лазерных, плазменных, ВЭН ТВЧ) источников нагрева и импульсного пластического деформирования ультразвуковым инструментом. В основе комбинирования лежат три базовые схемы, различающиеся между собой последовательностью ввода источников теплового и деформационного воздействий в зону обработки.

Если базовая схема I предполагает введение деформационного воздействия в определенной фазе термического цикла от теплового источника, то в базовой схеме II деформационное воздействие предшествует тепловому, осуществляя структурную подготовку материала поверхностного слоя перед высокоскоростным нагревом [2]. Базовая схема III характеризуется ультразвуковым пластическим деформированием поверхностного слоя после завершения структурно-фазовых превращений после высокоскоростного нагрева и охлаждения [3].

На основе теоретического анализа базовых схем были определены температурно-временные критерии комбинирования источников воздействия, а также установлены признаки возможного комбинирования высокоинтенсивных источников по определенным базовым схемам [4]. Так для реализации комбинирования термодеформационных источников по базовой схеме I необходимо соблюдение так называемого геометрического признака, когда размеры зон воздействия от термического и деформационного источников сопоставимы, как должно быть сопоставимо время их воздействия. Для базовых схем II и III нет ограничивающих требований по соблюдению геометрического и временного признаков комбинирования.

Таким образом, попытки создания комбинированных технологий с использованием иных видов термического и деформационного воздействий по определенным базовым схемам должны учитывать соблюдение отмеченных признаков комбинирования и температурно-временного критерия.

В перечне развивающихся в настоящее время технологий поверхностной обработки представляет интерес нагрев изделия в электролитной плазме. Нагрев анода в электрохимической ячейке с образованием вокруг него светящейся газовой оболочки был обнаружен еще в XIX веке [5]. Небольшая по сравнению со стационарным нагревом длительность нагрева, возможность осуществления как термического, так и химико-термического упрочнения позволили реализовать данный процесс как самостоятельную технологию химико-термического упрочнения деталей машин и инструментов [6].

Цементация поверхностного слоя низкоуглеродистых сталей является распространенной операцией химико-термической обработки различного рода деталей. Однако традиционная схема цементации в условиях стационарного нагрева представляет довольно длительный процесс нагрева, диффузионного насыщения и последующего охлаждения. В связи с этим привлекательной представляется схема цементации поверхностного слоя низкоуглеродистых сталей при нагреве с возможностью совмещения процесса насыщения углеродом поверхностного слоя и последующей высокоскоростной его закалки в этом же электролите. Для реализации анодного нагрева авторами работы [7] была создана экспериментальная установка, обеспечивающая как нагрев образца в условиях электролитной плазмы, так и возможность последующего охлаждения за счет скоростной прокачки электролита. Моделирование теплофизических процессов, протекающих в условиях электролитного нагрева, позволили оценить температурно-временные условия для развития диффузионных процессов насыщения углеродом поверхностного слоя образца [8]. Оптимизация технологических режимов цементации образца, выполненного из стали 20, показала возможность получения упрочненных поверхностных слоев толщиной до 150 мкм, при максимальном значении микротвердости на поверхности до 10 ГПа [9, 10]. Возможность использования данной технологии для упрочнения реальных деталей показана в работе [11].

Несмотря на всю привлекательность процесса цементации в условиях электролитного нагрева, структурно-фазовое состояние материала поверхностного слоя, его напряженное состояние нельзя считать оптимальными с позиций эксплуатационных свойств изделия. Так при закалке материала с высоким содержанием углерода в поверхностном слое после цементации в его структуре неизбежно образование определенной доли остаточного аустенита. Высокотемпературные условия цементации (900 – 1000 ^{0}C) [8] и относительная длительность процесса (до 10 мин) способствуют росту аустенитного зерна при нагреве и формированию крупноигольчатой структуры мартенсита при последующем высокоскоростном охлаждении. Кроме этого, в поверхностном слое возможно формирование остаточных напряжений растяжения, негативно влияющих на последующую эксплуатацию в условиях знакопеременного нагружения.

Введение ультразвукового пластического деформирования в базовые схемы комбинированного упрочнения направлено на реализацию определенных механизмов по управлению структурно-фазовым состоянием материала поверхностного слоя [2, 12], формированию благоприятного его напряженно-деформированного состояния [13, 14]. Кроме этого, благодаря специфичным механофизическим особенностям ультразвукового пластического деформирования металлических материалов на обработанной поверхности детали формируется микрогеометрия поверхности, представляющая собой регулярный микрорельеф. Создание подобного микрорельефа обеспечивает повышение маслоудерживающих свойств, что не маловажно при эксплуатации детали в условиях износа. Разработке технологических условий обеспечения качества поверхности, прогнозированию ее геометрического состояния и морфологии, а также математическому моделированию формирования микрогеометрии при ультразвуковом пластическом деформировании посвящены работы [15 – 18].

Совместный анализ результатов упрочнения поверхностного слоя в условиях электролитного нагрева и ультразвукового пластического деформирования позволяет предположить возможность их использования в комбинировании по базовой схеме III, предусматривающей на 1 этапе электролитную цементацию с последующей закалкой, а на 2 этапе – ультразвуковое пластическое деформирование высокоуглеродистого закаленного поверхностного слоя. Ультразвуковое пластическое деформирование перед электролитным нагревом согласно базовой схемы II не представляется целесообразным, поскольку структурная подготовка материала поверхностного слоя, полученная в результате пластического деформирования, будет аннулирована при последующем высокотемпературном относительно длительном нагреве. Комбинирование рассматриваемых процессов по базовой схеме I нереализуемо ввиду невозможности введения деформирования в условиях электролитного нагрева, не выполнения температурно-

временного критерия и не соблюдения геометрического признака.

Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям по оценке роли ультразвукового пластического деформирования в формировании поверхностного слоя после цементации в электролитной плазме.

3. Методика экспериментального исследования

Экспериментальные исследования по цементации образцов в электролитной плазме проводили на установке, конструкция и принцип действия которой изложены в работе [7]. Образцы изготавливались цилиндрической формы ∅ 10 мм, длиной 5 мм из низкоуглеродистой стали 20. Углеродосодержащим электролитом служил водный раствор, в составе которого 15% хлорида аммония и 10% ацетона. На основании результатов предварительных исследований [9, 10] по отработке режимов цементации были определены значения основных параметров процесса: рабочее напряжение на электродах – 240 В, время электролитного нагрева – 7 минут. Согласно методики [7] по совмещению цементации в электролитной плазме и закалки, сразу после окончания нагрева и отключения рабочего напряжения образец охлаждался в электролитном растворе при его интенсивной прокачке.

Реализация следующей стадии комбинированной обработки по базовой схеме III – ультразвукового упрочнения, проводилась на специальной установке [19]. Режимы ультразвукового пластического деформирования были выбраны в соответствии с ранее проведенными исследованиями [15, 16, 18] по установлению технологических ограничений для обеспечения качества обрабатываемых поверхностей. Так значение кинематических параметров обработки – подачи и скорости обработки составили 0,08 мм/об и 45 м/мин, соответственно. Для оптимизации динамических параметров ультразвукового деформирования были установлены следующие значения амплитуды ультразвукового инструмента – 13 и 22 мкм, статического усилия 50, 90, 130 Н.

Исследования микротвердости после каждого этапа обработки проводили как по поверхности, так и по глубине поверхностного слоя на предварительно подготовленных шлифах с помощью микротвердомеров ПМТ-3М и Wolpert Group 402 MVD. Изучение топографии поверхности осуществляли с использованием трехмерной сканирующей интерферометрии на комплексе ZYGO New View 7300.

4. Результаты и обсуждения

Реализация первого этапа базовой схемы III комбинированной обработки – цементации поверхностного слоя стали 20 в электролитной плазме направлена на его насыщение углеродом в процессе высокотемпературного нагрева с последующей закалкой. Результатом этого является формирование закаленного поверхностного слоя, распределение микротвердости по сечению которого представлено кривой 1 на рисунке 1. Характер изменения микротвердости свидетельствует о наличии ее максимального значения (до 9440 МПа) на глубине ~ 100 мкм. Снижение микротвердости у поверхности до 5850 МПа можно объяснить явлением самоотпуска при охлаждении образца в электролите. Максимальное значение микротвердости свидетельствует об образовании закалочных структур со значительным содержанием углерода. Постепенное уменьшение микротвердости по глубине вплоть до микротвердости исходного материала с низким содержанием углерода свидетельствует о снижении содержания углерода от поверхности образца.



Рисунок 1 - Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя:
1 – после цементации и закалки в электролитной плазме;
2 – после ультразвукового поверхностного пластического деформирования.

Несмотря на формирование закаленного поверхностного слоя в результате осуществления 1 этапа комбинированной обработки следует отметить ряд негативных моментов, связанных с образованием определенной доли остаточного аустенита в зоне высокоуглеродистого мартенсита, наличие остаточных напряжений растяжения, сформированных в условиях нагрева и высокоскоростного охлаждения поверхностного слоя.

На частичное или полное исключение отмеченных негативных явлений ориентировано проведение 2 этапа комбинированной обработки – ультразвукового поверхностного упрочнения.

Высокоинтенсивное пластическое деформирование наряду с ростом микротвердости (до 20 – 25%) на определенном участке поверхностного слоя (кривая 2, рис. 1), приводит к снижению остаточного аустенита до 50%, формированию остаточных напряжений сжатия, что подтверждается результатами работ [3, 4, 13].

Размер участка поверхностного слоя (до 200 мкм), на котором наблюдается рост микротвердости, соответствует размеру очага деформации при ультразвуковом упрочнении подобного рода структур [11].

Разная степень прироста микротвердости на участках с различной твердостью деформируемой структуры подтверждается результатами экспериментальных работ автора [1], представленными на рисунке 2.

Наряду с достижением определенного упрочняющего эффекта на 2 этапе комбинированной обработки ультразвуковому пластическому деформированию присуще наличие чистового эффекта, связанного с формированием регулярного микрорельефа на обработанной поверхности [15 – 18].

Топография поверхности образца после ультразвукового пластического деформирования, представленная на рисунке 3, подтверждает формирование на ней специфичной микрогеометрии в виде регулярного микрорельефа.

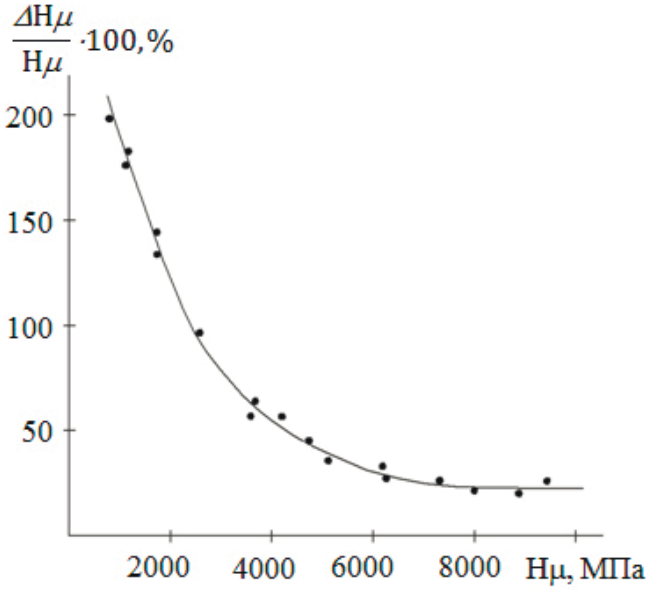


Рисунок 2 - Зависимость прироста микротвердости после ультразвукового пластического деформирования структур различной исходной твердости

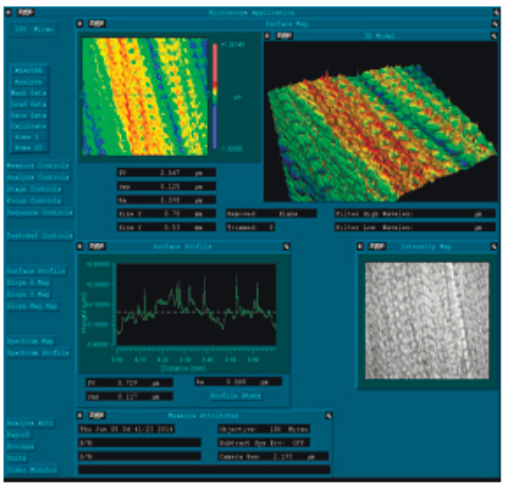


Рисунок 3 - Топография поверхности образца после ультразвукового пластического деформирования

5. Выводы

Реализация комбинированной химико-термической обработки с последующим ультразвуковым пластическим деформированием образца, выполненного из низкоуглеродистой стали 20, позволила получить высокопрочный поверхностный слой толщиной до 400 мкм с максимальным значением микротвердости до 10500 МПа. При этом на поверхности формируется регулярный микрорельеф определенной конфигурации.

Наличие высокопрочного поверхностного слоя и специфичного микрорельефа предполагает повышение эксплуатационных свойств деталей машин и инструментов в условиях трения, а формирование остаточных сжимающих напряжений обеспечивает рост усталостной прочности при знакопеременных нагрузках при эксплуатации.

Список литературы

1. *Рахимянов Х. М.* Теоретические основы комбинирования высокоинтенсивных термических и деформационных процессов в поверхностной обработке. Автореферат диссертации на соискание уч. степени доктора технических наук / Тула, 1998, 40 с.

2. *Исхакова Г. А.* Структурная подготовка перлита ультразвуковым деформированием перед плазменной закалкой / Г. А. Исхакова, Х. М. Рахимянов // Электронная обработка материалов. 1990. №5. С. 22 – 24.

3. *Рахимянов Х. М.* Поверхностное упрочнение с использованием низкотемпературной плазмы и ультразвука / Х. М. Рахимянов, Г. А. Исхакова // Электронная обработка материалов. 1990. №5. С. 9 – 12.

4. *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. – (Низкотемпературная плазма; т. 18).

5. *Белкин П. Н.* Химико-термическая обработка сталей и порошковых сплавов / П. Н. Белкин А.Б. Белихов, С.Н. Бошин [и др.] – Кострома: Изд-во КГТУ, 1998. – 114 с.

6. *Суминов И. В.* Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / И. В. Суминов, П. Н. Белкин, А. В. Эпельфельд [и др.] – Москва: Техносфера, 2011. – 464 с. (Мир материалов и технологий; т. 1).

7. Рахимянов Х. М. Установка для химико-термической обработки в электролитной плазме / Х. М. Рахимянов, А. С. Еремина // Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск, 2006. – №3 (45). – С. 141 – 144.

8. *Рахимянов Х. М.* Моделирование тепловых процессов тонкоструйной плазменной резки / Х. М. Рахимянов, А. Х. Рахимянов, С. В. Лунин // Инновации в машиностроении: тр. II Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 6 – 8 окт. 2011 г. – Кемерово, 2011. – С. 161 – 165.

9. *Рахимянов Х. М.* Цементация низкоуглеродистой стали при нагреве в электролитах / Х. М. Рахимянов, А. С. Еремина // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 3. С. 9 – 12.

10. *Рахимянов Х. М.* Оптимизация технологических режимов электролитно-плазменного упрочнения низкоуглеродистых сталей / Х. М. Рахимянов, К. Х. Рахимянов, А. С. Еремина // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Часть 2 / под ред. А. Г. Суслова, А. М. Маркова. – Барнаул, 2014. – С. 96 – 99.

11. *Семенова Ю. С.* Упрочняюще-чистовая обработка деталей цементацией в электролитной плазме / Ю. С. Семенова, А. С. Еремина, Р. С. Проскурин // Механики XXI веку – 2015. – С. 131 – 134.

12. *Рахимянов Х. М.* Роль ультразвукового пластического деформирования в формировании структуры поверхностного слоя при комбинированной обработке / Х. М. Рахимянов, Ю. В. Никитин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. - № 1. – С. 39 – 44.

13. *Рахимянов Х. М.* Напряженное состояние поверхностного слоя материалов после комбинированного упрочнения / Х. М. Рахимянов // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-96: материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 23 – 26 сен. 1996 г. – Новосибирск, 1996. – С. 154 – 158.

14. *Исупов А. В.* Прогнозирование состояние материала в очаге деформации при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании / А. В. Исупов, Ю. В. Никитин, Х. М. Рахимянов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 4. – С. 41 – 46.

15. *Рахимянов Х. М.* Технологические особенности обеспечения параметров качества поверхности при обработке ультразвуковым пластическим деформированием / Х. М. Рахимянов, Ю. С. Семенова, А. С. Еремина // I Междунар. науч. конф. молодых ученых «Электротехника, энергетика, машиностроение» Новосибирск, 2 – 6 декабря 2014 г. – Новосибирск, – 2014. – С. 144 – 147.

16. *Рахимянов Х. М.* Прогнозирование геометрического состояния поверхности цилиндрических деталей из Стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании / Х. М. Рахимянов, Ю. С. Семенова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. - № 3. – С. 11 – 17.

17. *Рахимянов Х. М.* Формирование морфологии поверхности в процессе ультразвукового пластического деформирования деталей машин / Х. М. Рахимянов, Ю. С. Семенова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 10. – С. 20 – 23.

18. *Рахимянов Х. М.* Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании / Х. М. Рахимянов, Ю. С. Семенова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 2. – С. 3 – 10.

19. *Рахимянов Х. М.* Установка для ультразвукового пластического деформирования по токарной схеме / Х. М. Рахимянов, Ю. С. Семенова, М. А. Третьяков // Наука. Технологии. Инновации. Материалы Всерос. науч. студенч. конф. молодых ученых. Новосибирск. 4 – 5 декаб. 2009 г. – Новосибирск, 2009. – С. 44 – 46

THE ROLE OF ULTRASONIC SURFACE PLASTIC DEFORMATION IN THE FORMATION OF THE SURFACE LAYER AFTER THE CARBURIZING AND HARDENING IN PLASMA ELECTROLYTE

Rakhimyanov Kh.M. D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru
Rakhimyanov K.Kh. C.Sc. (Engineering), Associate Professor,
e-mail: backtof79@mail.ru
Semenova Ju.S. C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: nahat@yandex.ru
Eremina A.S. Senior lecturer, e-mail: a.eremina@corp.nstu.ru
Tovkach O.L. graduate student, e-mail: olga.tovkach@mail.ru

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

Abstract: The possibility of using basic scheme combined high-intensity thermal and deformation processes to create a combined treatment of chemical and thermal hardening in electrolytic plasma and ultrasonic plastic deformation. Based on the analysis of the principles of combining these processes, compliance with the geometric characteristics and temperature-time criterion their combination is proposed to use to combine basic scheme III. Experimentally proved the effectiveness of this treatment provides the formation of high-surface layer on the samples, made of steel 20, up to 400 microns, with a maximum hardness to 10500 MPa, and formed on the surface of the regular microrelief.

Keywords: combined treatment, chemical heat treatment, ultrasonic plastic deformation, plasma electrolyte, carburizing, hardening, high surface layer.

УДК 621.9.048.6

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРУЕМОГО МИКРОРЕЛЬЕФА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

РАХИМЯНОВ Х.М[1]., доктор техн. наук, профессор,
СЕМЕНОВА Ю.С[1]., канд. техн. наук,
ЕРЕМИНА А.С[1]., старший преподаватель
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)

Рахимянов Х. М. – 630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 22,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: Kharis51@mail.ru

Аннотация: В работе рассматриваются особенности формирования микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании. Проведен анализ факторов, влияющих на геометрические параметры микрорельефа. С помощью модели формирования микрорельефа выявлено, что при одной и той же концентрации отпечатков на единицу обрабатываемой поверхности, ее топография может иметь различные виды. Установлено влияние соотношения скорости и подачи при ультразвуковом пластическом деформировании на равномерность распределения единичных отпечатков индентора по обрабатываемой поверхности для условий обработки цилиндрических поверхностей по токарной схеме. Предложены технологические рекомендации по выбору режимов обработки в соответствии с необходимым рисунком топографии поверхности.

Ключевые слова: Ультразвуковое пластическое деформирование, модель формирования микрорельефа, фрагменты микрорельефа, регулярный микрорельеф, волнистость, скорость, подача, частота ультразвуковых колебаний, элементарный фрагмент микрорельефа.

1. Введение

Известно, что выбор режимов обработки при ультразвуковом пластическом деформировании (УЗПД) определяет широкий спектр свойств обрабатываемой поверхности. Данная работа посвящена исследованию геометрических параметров топографии поверхности при различных условиях обработки. В работах [1, 2] дано теоретическое обоснование процессов, протекающих при УЗПД и представлена модель формирования микрорельефа, согласно которой определяются режимы обработки, обеспечивающие формирование фрагментов заданной формы (4 варианта). Кроме того, показано, что меняя режимы обработки, можно получать не только полностью новый регулярный микрорельеф, но и частично регулярный микрорельеф. При этом дано соотношение параметров скорости и подачи, являющееся условием формирования регулярного микрорельефа. В дальнейших работах [3, 4] представлено развитие модели для определения трехмерных характеристик фрагментов микрорельефа.

В работах [5, 6] отмечается влияние исходного состояния поверхности перед УЗПД на результат обработки. Показано, что высота микронеровностей, полученных на предшествующей обработке не должна превышать некоторого критического значения, определяемого в зависимости от конкретных условий обработки. При этом необходимо учитывать возможность появления волнистости. Условия ее формирования и зависимость ее геометрических параметров от режимов обработки описаны в работах [7, 8]. Однако, появление волнистости не влияет на формирование микрорельефа [8, 9].

Проведение экспериментальных исследований для подтверждения полученных в вышеописанной модели зависимостей показало, что в расчетах необходимо учитывать технологические возможности применяемого оборудования, поскольку работа с реальным оборудованием имеет свои особенности и ограничения. Так, дрейф частоты генератора ультразвуковых колебаний приводит к значительному искажению рисунка топографии поверхности, недостаточное значение статического усилия поджатия инструмента к обрабатываемой поверхности не исключает появления на ней следов предшествующей обработки [9, 10].

Все проведенные исследования позволяют дать технологические рекомендации по назначению режимных параметров обработки при УЗПД для конкретных условий. Однако в ходе исследований не был учтен такой параметр, как равномерность распределения единичных отпечатков индентора в направлениях скорости и подачи. Следует отметить, что для обеспечения равномерного распределения свойств по обрабатываемой поверхности необходимо стремить-

ся создавать регулярный микрорельеф с относительно равными высотными и шаговыми параметрами во всех направлениях измерения. В данной работе показано каким образом можно управлять равномерностью распределения фрагментов по обрабатываемой поверхности.

2. Теоретический анализ модели формирования микрорельефа при УЗПД

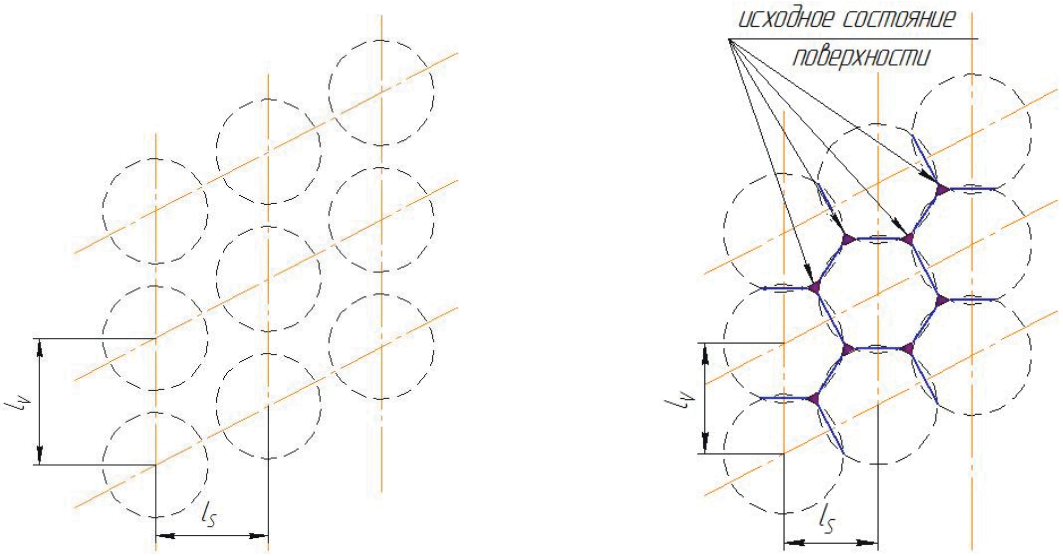
Одной из характеристик регулярного микрорельефа является концентрация его фрагментов на единице обработанной поверхности. В работе [11] количество отпечатков, приходящихся на единицу площади, определяется выражением

$$N = \frac{1\left[мм^2\right]}{l_V \cdot l_S},$$

где l_V и l_S - расстояния между соседними отпечатками индентора в направлениях скорости и подачи, соответственно. При этом соотношение величин l_V и l_S не влияет на количество отпечатков на исследуемом участке. При этом возможен вариант, когда отпечатки индентора не перекрываются, или перекрываются частично (рис.1 а, б), то есть необходимо проверять условие получении полностью нового регулярного микрорельефа. [11]:

$$2\sqrt{D_c \cdot h_{\max}} \geq \sqrt{\left\{S^2 + \left[\frac{V_Д(1-m)}{60 \cdot f}\right]^2\right\}\left\{1 + \left(\frac{m \cdot V_Д}{60 f S}\right)^2\right\}}, \quad (1)$$

где D_c – диаметр сферы деформатора, мм , h_{max} – максимальная глубина единичного отпечатка деформатора, мм , S – подача, мм/об, $V_Д$ - скорость вращения детали, м/мин, f – частота колебаний ультразвукового инструмента, Гц, m – дробная часть числа фрагментов микрорельефа на одном витке при токарной обработке цилиндрической поверхности.



а б

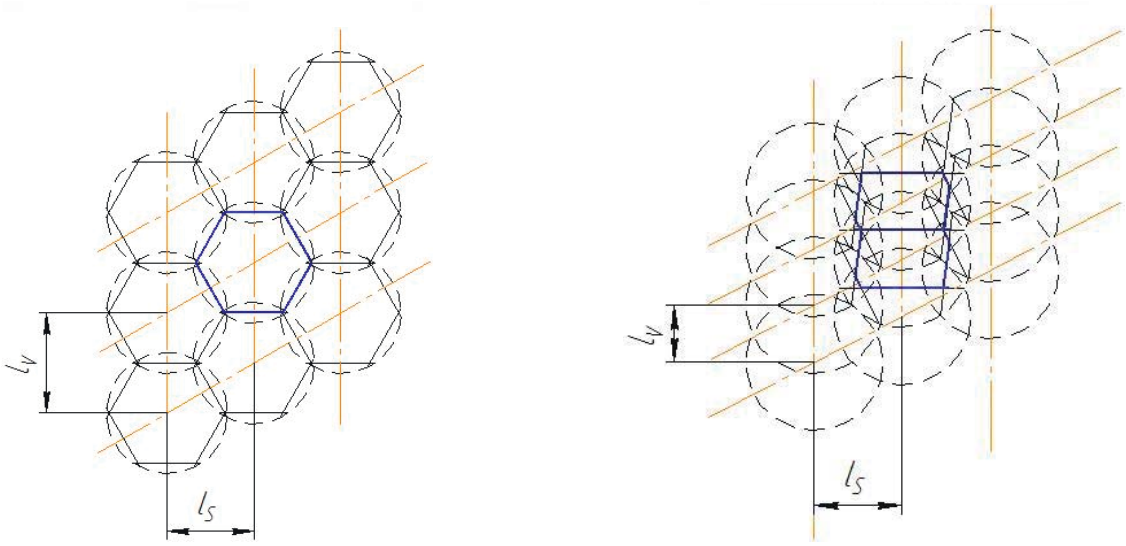
Рисунок 1 - Частично регулярный микрорельеф, формируемый при УЗПД

Величины подачи и скорости определяют расстояние между соседними отпечатками индентора в направлениях V и S, соответственно (рис. 2). Соблюдение условия формирования полностью нового регулярного микрорельефа зависит от сочетания деформационных и кинематических параметров обработки Однако, как видно из рисунка, выполнение условия формирования полностью нового регулярного микрорельефа не определяет равномерности его свойств: видно, что в пределах одного и того же расстояния в направлениях V и S количество отпечатков различно.

Расстояние между соседними отпечатками в направлении подачи равно величине подачи за один оборот. Аналогичное расстояние в направлении V определяется по формуле [8]:

$$l_V = \frac{V_Д}{60 f} = \frac{\pi D n}{6 \cdot 10^4 \cdot f} \quad (2)$$

Таким образом, для получения симметричных шаговых параметров микрорельефа во взаимно перпендикулярных направлениях сводится к сравнению величин l_V и l_S и пересчету соответствующих значений режимов обработки.



а б

Рисунок 2 - Взаимное расположение и перекрытие соседних отпечатков индентора при УЗПД
а) l_V / l_S = 1,15; б) l_V / l_S =0,6

3. Результаты и обсуждение

В реальных условиях обработки режимные параметры обработки зависят от возможностей оборудования, требований к качеству обрабатываемой поверхности и параметров самой обрабатываемой детали.

Поскольку большинство используемых токарных станков, обеспечивающих кинематику процесса имеют дискретную установку числа оборотов и подачи, то для обеспечения полностью нового регулярного микрорельефа с равномерным распределением неровностей установим диапазон соотношений l_V / l_S от 0,8 до 1,2.

В таблице приведен пример значений скорости и подачи для обработки УЗПД детали диаметром 50 мм из стали 45 (НВ 2000) при частоте ультразвуковых колебаний f=22 кГц с усилием прижима ультразвукового инструмента 100 Н. Проверка условия (1) показала, что регулярный микрорельеф обеспечивается во всем диапазоне применяемых при УЗПД скоростей и подач. Минимальное значение скорости и подачи для выхода за ограничение (1) составляет 670 м/мин и 0,5 мм/об, соответственно (диаметр единичного отпечатка $d_{отп}$=0,67мм).

4. Выводы

Проведенные исследования позволяют установить режимные параметры обработки, обеспечивающие не только формирование полностью нового регулярного микрорельефа, но и равномерность шага во взаимно перпендикулярных направлениях. Представленные в таблице данные позволяют оценить диапазон и соотношение режимных параметров УЗПД, соответствующих условию формирования микрорельефа с наиболее равномерным распределением микронеровностей.

Таблица 1. Выбор режимов УЗПД для обеспечения равномерности шаговых параметров микрорельефа

n, об/мин	V, м/мин	l_V , мм	l_S , мм	S, мм/об
350	55	0,041	0,03…0,045	-
700	110	0,083	0,06…0,099	0,08
1000	157	0,142	0,11…0,17	0,11
1350	211	0,16	0,12…0,192	0,14
1700	267	0,2	0,16…0,24	0,18
2000	314	0,23	0,18…0,27	0,26
2350	369	0,28	0,22…0,34	0,26

Список литературы

1. Рахимянов Х.М. Высокоэнергетические процессы обработки материалов: монография / О.П. Солоненко, Х.М. Рахимянов, А.П. Алхимов, В.В. Марусин, А.М. Оришич, Р.А. Салимов, В.Г. Щукин, В.Ф. Косарев. – Новосибирск: Наука. Сиб. издательская фирма РАН, 2000. – 425 с. – (Низкотемпературная плазма. Т. 18).

2. Рахимянов Х.М. Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании / Х.М. Рахимянов, Ю.С. Семенова // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2010. №2. - С. 3-10.

3. Surface preparation of machine parts and instruments by ultrasonic impact treatment before coating / Rackhimyanov Kh.M., Nikitin Y.V., Semyonova Ju.S. // The Third International Forum on Strategic Technologies, June 23-29, 2008. Novosibirsk-Tomsk, Russia. - 2008. - p.108-114.

4. Рахимянов Х.М. Анализ модели формирования регулярного микрорельефа поверхности при ультразвуковом пластическом деформировании / Х. М. Рахимянов, Ю. С. Семенова // III Всероссийская научно-практическая конференция /"Управление качеством образования, продукции и окружающей среды". Барнаул, Изд-во АлтГТУ. - 2008 г., С. 135-139.

5. Рахимянов Х. М. Выбор режимов ультразвукового пластического деформирования для обеспечения геометрического состояния поверхности при ее подготовке перед нанесением покрытия / Х. М. Рахимянов, Ю. С. Семенова, М. А. Сауткина, В. А. Скрынник, А. П. Лихачев // Инновации в машиностроении: тр. 4 междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 2–4 окт. 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 198-203.

6. Рахимянов Х. М. Обеспеч. качества поверхности деталей машин ультразвуковым пластическим деформированием перед нанесением покрытия / Х. М. Рахимянов, Ю. С. Семенова, М. А. Сауткина, В. А. Скрынник, А. П. Лихачев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2013. - № 2(59). - С. 4-7.

7. Рахимянов Х. М. Формирование морфологии поверхности в процессе ультразвукового пластического деформирования деталей машин / Х. М. Рахимянов, Ю. С. Семенова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. - №10 - С. 20-23.

8. Рахимянов Х. М. Прогнозирование геометрического состояния поверхности цилиндрических деталей из стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании / Х. М. Рахимянов, Ю. С. Семенова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 3 (52). – С. 11–17.

9. Рахимянов Х. М. Технологические особенности обеспечения параметров качества поверхности при обработке ультразвуковым пластическим деформированием / Х. М. Рахимянов, Ю. С. Семенова, А. С. Еремина // 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. 145-148.

10. Рахимянов Х. М. Условие образования волнистости поверхности при ультразвуковом пластическом деформировании металлических материалов / Х. М. Рахимянов, Ю. В. Никитин, Ю. С. Семенова // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты.-2012. - № 1 (54). - С. 4-9.

11. Рахимянов Х.М. Теоретические основы комбинирования высокоинтенсивных термических и деформационных процессов в поверхностной обработке: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. - Тула, 1998, 40 с.

EFFECT OF ULTRASONIC PLASTIC DEFORMATION MODES ON MICRORELIEF GEOMETRIC PARAMETERS OF MACHINED SURFACES

Rackhimyanov Kh.M.[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@ mail.ru
Semyonova Ju.S.[1], C. Sc. (Engineering), Associate professor, e-mail: nahat@yandex.ru
Eryomina A.S.[1], M.Sc. (Engineering), Senior lecturer, e-mail: 8951048@mail.ru

Abstract: The paper discusses the features of the formation of micro-relief by ultrasonic plastic deformation. The analysis of the factors influencing the geometric parameters of microrelief carried out. With the model of the microrelief formation it is revealed that for the same concentration of prints per unit of the treated surface, its topography can have different types. The influence of the speed and feed during the ultrasonic plastic deformation on the uniformity of the single indenter imprints on the machined surface for the turning of the cylindrical machine parts established. Technological recomendations on the choice of machining mode according to the desired type of the surface topography are proposed.

Keywords: Ultrasonic plastic deformation, a model of micro-relief forming, microrelief fragments, regular microrelief, waviness, speed, feeding, frequency of ultrasonic vibrations, elementary micro-relief fragment.

УДК 621.941.08

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСОВ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ

А.Н. РОМАШЕВ[1], канд. техн. наук, доцент,
А.М. МАРКОВ[2], доктор техн. наук, профессор
([1]БТИ АлтГТУ, г. Бийск, [2]АлтГТУ, г. Барнаул, 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 рассматривается краткий обзор методов мониторинга, методов обработки сигналов и видов средств диагностирования режущего инструмента. Состояние инструмента сильно зависит от неисправностей, которые могут возникнуть во время операции обработки, поэтому имевший место тип неисправности может быть использован для принятия решения о дальнейшем его использовании. Для наглядности представления сравнительной оценки использования резюмируемых факторов показаны в виде рисунков условные диаграммы. Развитие и совершенствование систем мониторинга состояния и диагностики режущего инструмента приобретает все большую актуальность, и именно такая система позволить реализовать оптимальное использование ресурса режущего инструмента, хотя только небольшому числу из всех доступных методов свойственна стадия промышленной реализации.

Ключевые слова: Система мониторинга состояния и диагностики режущего инструмента, методы мониторинга, обработка сигналов, средства диагностирования.

Введение. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 13381-1-2011 Контроль состояния и диагностика машин, введенный в действие с 1 декабря 2012 года, определяет, что полный цикл контроля состояния машины включает в себя пять этапов, которые вполне правомерно можно применить и к одному из наиболее важных элементов в технологической системе механической обработки – режущему инструменту:

- обнаружение отклонения в поведении режущего инструмента;
- выявление неисправностей режущего инструмента и их причин;
- прогнозирование развития неисправностей режущего инструмента;
- принятие рекомендаций по корректирующим действиям;
- анализ состояния после замены режущего инструмента.

Вполне закономерно, что прогнозирование технического состояния режущего инструмента (требующее предсказания, в какой степени его работоспособность сохранится в будущем), основанное только на статистическом подходе, не предполагает безошибочных решений. Поэтому развитие и совершенствование систем мониторинга состояния и диагностики режущего инструмента (МСД РИ) приобретает все большую актуальность и именно такая система позволить реализовать оптимальное использование ресурса режущего инструмента. Следует подчеркнуть тот факт, что только небольшому числу из всех доступных методов свойственна стадия промышленной реализации.

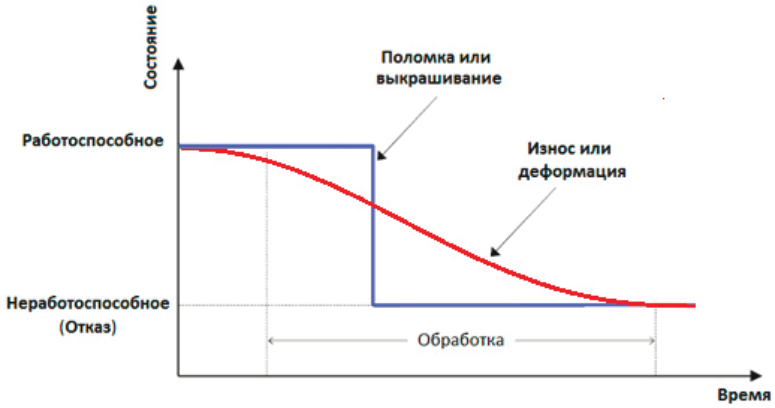


Рисунок 1 - Виды неисправностей режущего инструмента

Теория. Для прогнозирования развития неисправности требуется знание возможных видов отказов режущего инструмента, которые могут с ним случиться, и досконального понимание связей между рабочим состоянием режущего инструмента и видами его отказов. Поэтому прежде чем выполнять операции экстраполирования и прогнозирования, необходимо собрать данные об имевших место режимах работы режущего инструмента, изменениях эксплуатационных параметров и параметров технического состояния.

Состояние инструмента сильно зависит от неисправностей, которые могут возникнуть во время операции обработки. Как показано на рисунке 1, переход из работоспособного состояния в неработоспособное состояние инструмент может выполнить двумя путями [1].

Износ и деформации режущего инструмента развиваются со временем, создавая условия постепенной потери работоспособности инструмента. С другой стороны, поломки и выкрашивания происходят мгновенно, вызывая резкое прерывание обработки. Другими словами, износ и деформации режущего инструмента приводят к предсказуемой ситуации, что позволяет реализовать мониторинг его состояния, в то время как поломки и выкрашивания, как правило, непредсказуемы и непригодны для мониторинга. Следовательно, имевший место тип неисправности может быть использован для прогнозирования, иначе говоря, для диагностики. Оба типа неисправностей проявляются специфическими параметрами, которые возможно использовать для мониторинга состояния режущего инструмента (рисунок 2).



Рисунок 2 - Контролируемые параметры

Краткое представление методов наблюдения, которые отражены в доступной российской и зарубежной литературе приведены на рисунке 3. Среди исследователей существует очевидная тенденция по поводу применения определенных косвенных методов, таких как регистрация токовых параметров двигателя шпинделя, силы резания или ее составляющих, вибрации, акустической эмиссии и прямых методов, в том числе лазерного точечного сканирования, сканирующей электронной микроскопии, визуализации и объемного отображения структуры поверхности, оптической и оптико-электронной томографии. Это условно на рисунке демонстрируется длиной элементов пропорционально числу доступных источников информации [1].

Результаты и обсуждение.

Для получения достоверной информации из большой ее массы, которую можно извлечь из полученного сигнала, большое значение имеет метод обработки сигнала. Во многих случаях бывает так, что более сложные методы требуют значительных временных затрат и, следовательно, не подходят, например, для обнаружения аварийного отказа инструмента. При этом результаты со сложной функцией анализа чувствительны и к условиям резания, что делает диагноз более достоверным. С другой стороны, упрощенные методы быстры и часто не зависят в результате от изменения условий резания. К сожалению, в то же время они еще и не достаточно чувствительны, чтобы отслеживать постепенный износ инструмента. Перечень методов обработки сигналов, которые были выделены из литературных источников, приведены на рисунке 4. Среди исследователей наиболее распространенными по использованию методами обработки сигналов, на наш взгляд, являются методы определения статистических показателей, временных характеристик, а так же преобразования Фурье и вейвлет-анализ.



Рисунок3 - Методы мониторинга, представленные в доступной литературе



Рисунок 4 - Методы обработки сигнала

На рисунке 4 площадь кругов условно пропорциональна числу просмотренных доступных источников информации [1].

В тоже время и средства диагностирования играют важную роль в систематизации полученных и обработанных сигналов в системе МСД РИ и для принятия быстрых и точных решений о работоспособности инструмента. Виды используемых средств диагностирования, которые применялись авторами и описаны в литературе, приведены на рисунке 5. Следует отметить, что прослеживается четкая тенденция широкого применения средств нечеткой логики и нейронных сетей. На рисунке 5 размеры прямоугольников условно пропорциональны числу просмотренных доступных источников информации [1].

Алгоритмы нечеткой логики успешно применяются в различных областях. Среди прочего, системы нечеткой логики (системы нечеткого вывода, FL системы) были протестированы для мониторинга и диагностики технологического оборудования.

В работе [2], А. Соколовским рассматриваются некоторые специфические аспекты реализации системы FL для мониторинга оборудования и процесса резания. Основной сферой его исследований стала разработка стратегии контроля износа режущего инструмента, которая делает возможным предсказание износа независимо от условий резания. Он заметил, что такая система привела к неудовлетворительному уровню определения износа инструмента. При этом были отмечены некоторые важные недостатки; системы FL гораздо более чувствительны к количеству и качеству исходной информации. Например, результаты, полученные с FL систем, зависят от применяемых методов сбора данных. Кроме того, производительность систем может ухудшиться с ростом числа входов или увеличением количества нечетких правил. Также была выявлена более низкая обучаемость рассматриваемых систем. Вместе с тем, Соколовский пришел к выводу, что вышеперечисленные факты не означают пренебрежение систем FL для интеграции данных. Он сосредоточил внимание на потенциальных проблемах и трудностях, с которыми можно столкнуться при применении таких систем для диагностики станков и процесса резания, но это не означает, что для других применений системы не могут работать лучше, чем, например, нейронные сети.

В настоящее время общепризнано, что измерительный преобразователь для косвенного метода измерения является лучшим практическим решением для организации надежной системы мониторинга [3]. Кроме того, в последние годы, с помощью нейронных сетей (NNs) были успешно смоделированы сложные взаимосвязи между наборами признаков входных сигналов датчиков и данных об изнашивании инструмента. Нейронные сети обладают рядом свойств, которые делают их идеальными для эффективной обработки зашумленных и даже неполных наборов данных. Еще один мощный метод моделирования динамических систем с повышенным шумом является использование скрытых моделей Маркова (СММ).



Рисунок 5 - Применяемые виды средств диагностирования

В работе [3], С. Шеффером с соавторами представлена сравнительная оценка применения NNs и CMM для мониторинга состояния инструмента, описывая преимущества и недостатки обоих методов. Преимуществом NNs является их способность выполнять непрерывные оценки (хотя CMM также могут быть использованы для достижения этой цели). Недостатками NNs являются их относительная сложность по сравнению с CMM, а также тот факт, что для успешной реализации стратегии мониторинга на основе нейросети необходим сложный процесс ее обучения. Преимущества CMM состоят в том, что, если проблема хорошо понята, довольно просто инициализировать и реализовать основанную на CMM контрольную стратегию, так как компьютерные реализации CMM легко доступны. Однако CMM, как правило, содержат большое количество параметров и поэтому нуждаются в больших объемах данных, чтобы оценить параметры CMM должным образом. Наконец, CMM обычно не используются для того, чтобы сделать длительные оценки, а скорее для выполнения задач классификации. В работе [4], Д.К. Ойя и У.С. Диксит использовали нейронные сети для прогнозирования наименьшего, наибольшего и наиболее вероятного срока службы инструмента. Сравнение, которое сделано в той же статье между нейронными сетями и множественной регрессией (линейная регрессия с двумя или более объясняющими переменными), показывает превосходство первого.

Выводы. В работе было представлено краткое резюме методов мониторинга, методов обработки сигналов и диагностических средств для режущего инструмента. Необходимо отметить, что всем доступным методам, присутствующие недостатки и ограничения; наиболее эффективные и надежные методы для контроля износа инструмента настолько медленны на практике, что они не подходят для обнаружения внезапных отказов. Кроме того, весьма важна минимизация сложности любой будущей системы МСД РИ.

1. *P.N. Botsaris, J.A. Tsanakas,* “State-of-the-art in methods applied to tool condition monitoring (TCM) in unmanned machining operations: a review”, In *21st International Congress and Exhibition Condition Monitoring and Diagnositic Engineering Management*, Proceedings of COMADEM 2008, Prague, Czech Republic, pp. *73-87.*
2. *A. Sokolowski*, "On some aspects of fuzzy logic application in machine monitoring and diagnostics,"*Engineering Applications of Artificial Intelligence,* vol. 17, pp. 429-437, 2004.
3. *C. Scheffer, H. Engelbrecht, and P. S. Heyns,* "A comparative evaluation of neural networks and hidden Markov models for monitoring tool wear," *Neural Computing & Applications,* vol. 14, pp. 325-336, 2005.
4. *D. K. Ojha and U. S. Dixit,* "An economic and reliable tool life estimation procedure for turning," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 26, pp. 726-732, 2005.

THE ANALYSIS OF THE STATUS OF QUESTIONS OF MONITORING AND DIAGNOSING OF THE CUTTING TOOL IN PROCESSING

Romashev A.N.[1], C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mrsi@bti.secna.ru
Markov A.M.[2], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru
[1] Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU, 27 street Trofimova, Biysk, Altai Krai, 659305, Russian Federation
[2] I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenin prospect, Barnaul, Altai Krai, 656038, Russian Federation

Abstract: In article the short review of methods of monitoring, of methods of processing of signals and review of types of diagnostic tools of the cutting tool is considered. The condition of the tool strongly depends on failures which can arise during processing operation therefore the type of failure taking place can be used for making decision on its further use. For descriptive reasons representations of a comparative assessment of use of the summarized factors are shown conditional charts as the pictures. Development and improvement of systems of monitoring and diagnosing of the cutting tool gain the increasing relevance, and such system to allow realizing optimum use of a resource of the cutting tool

Keywords: System of monitoring and diagnosing of the cutting tool, monitoring methods, processing of signals, diagnostic tools.

УДК 621.941.08

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ РАССТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПРИ СБОРКЕ РАБОЧИХ КОЛЕС ТУРБОМАШИН

И. Н. Рыжиков
К. Т. Нгуен

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
rin111@list.ru

Аннотация: В статье представлены результаты численного и экспериментального исследований влияния расстройки параметров на колебания рабочих колес турбомашин. Разработаны практические рекомендации по сборке рабочих колес, порядку расстановки рабочих лопаток с расстройкой на ободе диска.

Ключевые слова: собственные колебания, циклическая симметрия, рабочие колеса турбомашин, расстройка параметров, локализация колебаний.

Конструкция рабочего колеса турбомашины, включающая диск и закрепленные в замках на его ободе рабочие лопатки, обладает свойством циклической симметрии. Поэтому, зачастую, при численном анализе колебаний и прочности рабочих колес используют это свойство, моделируя лишь сектор рабочего колеса, подразумевая, что конструкция абсолютно симметрична. Однако, в реальной конструкции в результате несовершенства изготовления и сборки всегда присутствуют небольшие различия секторов в геометрии, массе, условиях закрепления лопаток, которые носят название «расстройка параметров». По данным разных авторов, даже 1-процентная расстройка (отклонение собственной частоты лопатки от номинальной на 1 %) может привести к увеличению динамических напряжений при колебаниях от 20 до 110 % в результате локализации колебаний [1]. Цель данной работы – изучение влияния расстройки параметров на собственные частоты и формы колебаний моделей рабочего колеса, что является актуальной задачей. Одним из результатов работы является выработка рекомендаций по порядку расстановки рабочих лопаток с расстройкой разной степени в ободе рабочего колеса для минимизации вредного влияния расстройки на НДС и долговечность всей конструкции (рис. 1).

Для изучения влияния расстройки на колебания моделей рабочего колеса были проведены численный и натурный эксперименты.

1. Численный анализ собственных частот и форм колебаний модели рабочего колеса с расстройкой параметров

Уравнение свободных колебаний идеальной системы с поворотной симметрией в матричной форме может быть записано как:

$$([K]-\omega^2[M])\{\delta\}=0, \quad (1)$$

где ω - собственная частота колебаний системы; $[K]$, $[M]$ - соответственно, матрицы жесткости и масс, $\{\delta\}$ - вектор перемещений.



Рисунок 1 - Схема сборки рабочих колес с учетом разной степени расстройки рабочих лопаток

Зависимость между перемещениями на границах секторов задается уравнением:

$$\{\delta\}_{S+1}=e^{\mu}\{\delta\}_S, \quad \mu=i2\pi m/N, \quad (2)$$

где $i=\sqrt{-1}$, $s=1,...,N$, N - число секторов (лопаток), $m=0,1,2,...,N/2$ для четных N и $m=0,1,2,...,(N-1)/2$ для нечетных N, m – число форм колебаний.

В основе анализа свободных колебаний расстроенных систем с поворотной симметрией положен метод, описанный в работе [3], так называемый метод возмущений. В соответствии с этим методом мы имеем уравнение:

$$\{\ddot{\delta}\}+\omega_B^2[M']\{\delta\}=0 \quad , \qquad (3)$$

где

$$[M']=\begin{bmatrix} 1+2R^2+\Delta f_1 & -R^2 & 0 & \dots & -R^2 \\ -R^2 & 1+2R^2+\Delta f_2 & -R^2 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -R^2 & 0 & 0 & -R^2 & 1+2R^2+\Delta f_N \end{bmatrix} \qquad (4)$$

Здесь ω_B - номинальная собственная частота сектора без расстройки, $R^2=\omega^2/\omega_B^2$ - безразмерный коэффициент, $\Delta f_i=(\omega_{Bi}{}^2-\omega_B{}^2)/\omega_B{}^2$ - расстройка *i*-го сектора, ω - собственная частота колебаний системы без расстройки, ω_{Bi} - собственная частота колебаний *i*-го сектора.

Собственное значение системы с расстройкой может быть получено как

$$\{\omega_i\}^*=\{\omega_i\}+\Delta\{\omega_i\}+\Delta^2\{\omega_i\}\ , \qquad (5)$$

где *i=1,…,N,* $\{\omega_i\}$ - вектор частот сектора без расстройки, $\Delta\{\omega_i\}$ - вектор увеличения частоты первого порядка, $\Delta^2\{\omega_i\}$ - вектор увеличения частоты второго порядка.

Для получения перемещений системы с расстройкой можно использовать уравнение:

$$\{\delta_i\}^*=\{\delta_i\}+\Delta\{\delta_i\}+\Delta^2\{\delta_i\}, \qquad (6)$$

где *i=1,…,N,* $\{\delta_i\}$ = вектор перемещений сектора без расстройки, $\Delta\{\delta_i\}$ - вектор увеличения перемещений первого порядка, $\Delta^2\{\delta_i\}$ - вектор увеличения перемещений второго порядка.

Расстройка параметров – случайная величина, которая в большинстве случаев подчиняется закону нормального распределения Гаусса. На рис. 2 представлен чертеж модели рабочего колеса с 11-ю лопатками, имеющими отклонения от номинальной частоты в соответствии с законом Гаусса, и один из вариантов установки этих лопаток в колесе. Средняя (номинальная) частота колебаний отдельной лопатки (математическое ожидание μ) $f_{ном}$=476,5 Гц. Максимальное отклонение частоты от номинальной (среднеквадратичное отклонение σ) Δf=±14,3 Гц. Соответственно, длина диапазона отклонений частоты от номинальной (поле допуска на частоту) δ_f=28,6 Гц. Значения частот колебаний лопаток колеса лежат в данном диапазоне в соответствии с нормальным распределением Гаусса. Были исследованы 3 варианта с разным порядком расстановки лопаток в колесе. Для каждого варианта были получены формы и частоты собственных колебаний колеса и построены графики распределения амплитуд колебаний лопаток в окружном направлении (рис. 3). Наибольшее влияние расстройки на форму и частоту колебаний наблюдается для 2-го варианта, когда лопатки из набора, имеющие максимальную и минимальную частоты, расположены на разных концах диаметра диска. Наименьшее влияние расстройки при том же наборе лопаток наблюдается для 3-го варианта с «пилообразным» расположением лопаток в колесе, т.е. когда нарушено монотонное увеличение или уменьшение значений частоты лопаток при обходе колеса в окружном направлении.

2. Экспериментальное исследование собственных частот и форм колебаний модели рабочего колеса с расстройкой параметров

Для измерения вибрационных характеристик использовался лазерный сканирующий виброметр PSV-400, принцип работы которого основан на эффекте Доплера. Прибор измеряет сдвиг частоты отраженного от вибрирующей поверхности лазерного луча и вычисляет мгновенные значения виброскорости и виброперемещения. Основное преимущество такого виброметра в том, что он позволяет быстро и точно измерять механические вибрации конструкции, полностью исключая проблемы нагружения поверхности датчиками. Виброметр обладает возможностями измерений как мелких (мм^2), так и крупногабаритных конструкций (м^2) в диапазоне частот до 20 МГц и диапазоне виброскоростей до 20 м/с. В состав оборудования входят: высокочувствительная моторизованная лазерная головка, цветная видеокамера с автоматической фокусировкой и 72-кратным увеличением, новейший промышленный компьютер со специальным программным обеспечением.

Модель рабочего колеса представляла собой плоскую крыльчатку с центральным отверстием и 6-ю лопатками, вырезанную на высокоточной лазерной установке из листа стали толщиной 2 мм. Расстройка моделировалась путем присоединения к периферии лопаток отрезков магнитной ленты разной массы (рис. 4). Масса каждого отрезка измерялась на электронных весах с точностью до 0,001 г. В начале дополнительная масса присоединялась только к одной из лопаток колеса. Результаты измерений показали, что даже небольшая масса (менее 0,2 г) вносит заметные изменения в спектр частот и форм колебаний модели. Например, на 2-й форме наблюдается значительная локализация колебаний. При этом колеблется только одна лопатка, а остальные неподвижны (рис. 5).

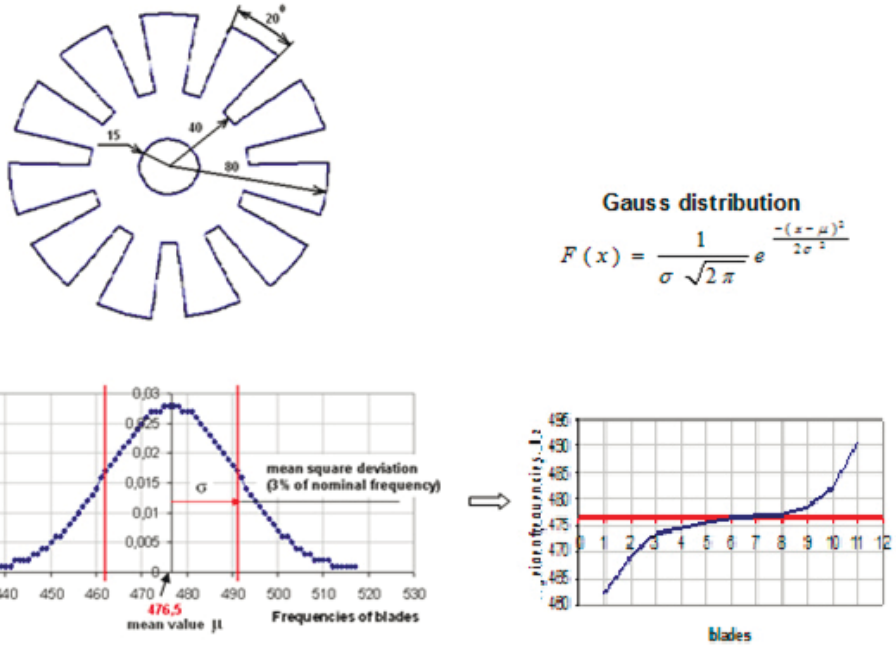


Рисунок 2 - Распределение собственных частот лопаток в колесе в соответствии с нормальным законом распределения Гаусса

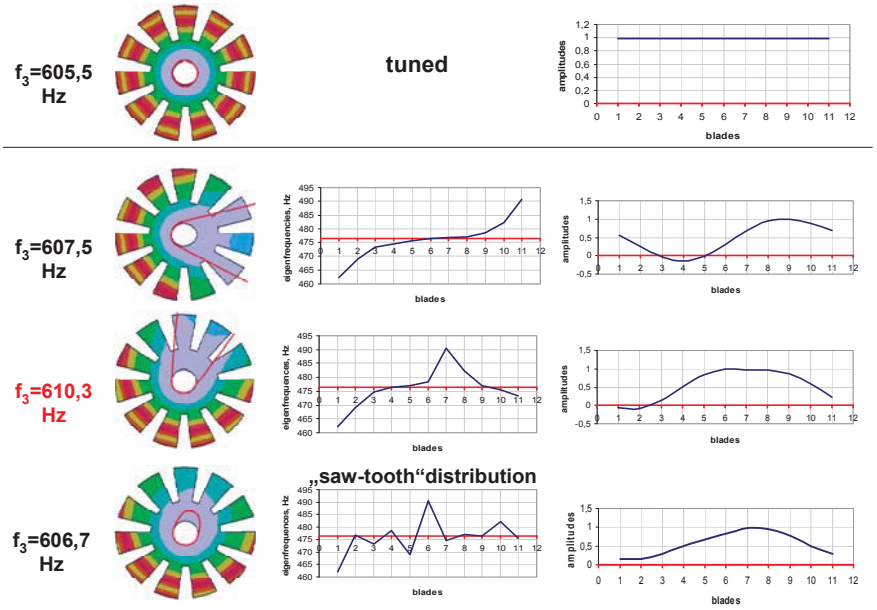


Рисунок 3 - Варианты расположения расстроенных лопаток в диске



Рис.4. Введение расстройки в модель

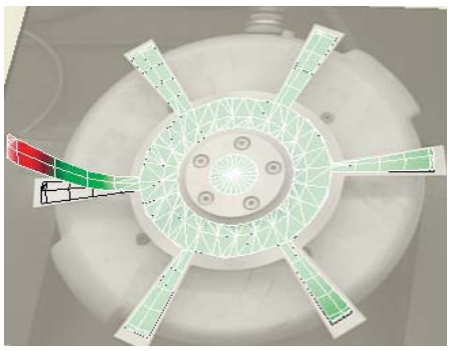


Рис.5. Локализация колебаний на 2-й форме

Также были исследованы 2 случая, когда дополнительная масса присоединялась ко всем 6-ти лопаткам колеса. В первом случае величина дополнительной массы равномерно увеличивалась от лопатки к лопатке от 0 до 1,2 г (0-0,2-0,4-0,6-0,8-1,0-1,2). Во втором случае масса в окружном направлении менялась скачкообразно по «пилообразному» закону (0-0,2-1,0-0,6-1,2-0,4-0,8). Сравнение результатов показало, в первом случае локализация колебаний больше, чем во втором. Также для первого случая различие в частотах парных форм больше, чем для второго (табл.).

Анализ результатов численного и экспериментального исследований моделей рабочих колес с расстройкой параметров позволил сделать следующие выводы:

1. При наличии в колесе одной лопатки с отклонениями параметров наблюдается «расщепление» частот парных форм колебаний (см. табл.).
2. Сравнительно небольшая расстройка (1%) приводит к локализации колебаний, когда искажается гармонический закон распределения амплитуд лопаток колеса в окружном направлении. При этом узловые диаметры принимают форму ломаных линий.
3. При сборке рабочего колеса необходимо учитывать степень расстройки рабочих лопаток и располагать их на ободе диска «пилообразно» с целью уменьшения вредного влияния расстройки на НДС рабочего колеса.

Таблица 1. Формы колебаний модельного рабочего колеса

Форма	Случай 1	Случай 2
f_1	79,844	80,031
f_2	81,75	82,032
f_2'	83,0625	82,344
f_3	88,7188	89,219
f_3'	90,313	90,094
f_4	96,719	96,6875
f_4'	98,938	98,9375

Список литературы

1. *Ewins D.J.* Vibration of bladed disks, PhD Thesis, Cambridge University, 1966.
2. *Рыжиков И.Н.* Экспериментальные исследования расстройки параметров моделей рабочих колес газотурбинных двигателей // Вестник Иркутского государственного технического университета, – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014 №12.
3. *Рыжиков И.Н., Нгуен Тьен Кует* Влияние расстройки параметров на частоты и формы колебаний конструкций с поворотной симметрией // Сборник статей Международной научно-практической конференции, - г. Уфа: Научно-издательский центр «Аэтерна», 10 апреля 2015 г.

ACCOUNTING FOR THE EFFECTS OF MISTUNING OF ROTOR BLADES IN THE ASSEMBLY OF GAS TURBINE ENGINES BLADED DISKS

Ryzhikov I.N.
Nguyen Q. T.
Irkutsk National Research Technical University
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074
rin111@list.ru

Abstract: The article presents the results of numerical and experimental studies of the effect of mistuning on vibrations of gas turbine engines bladed disks. Practical recommendations for the assembly of the bladed disks, the order of arrangement of rotor blades with a mismatch on the rim of the disc.

Keywords: natural vibration, cyclic symmetry, turbomachinery bladed disks, mistuning, localization of vibration.

УДК 621.923.1

ВЛИЯНИЕ КОНТУРА ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 30ХГСА НА МАКРОГЕОМЕТРИЮ ПРИ МАЯТНИКОВОМ ШЛИФОВАНИИ КРУГАМИ РАЗЛИЧНОЙ ПОРИСТОСТИ

Я.И. СОЛЕР[1], кандидат техн. наук, доцент,
В.Л. НГУЕН[1], аспирант
([1]ИрНИТУ, г. Иркутск, Россия)

Солер Я.И. - 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: solera@istu.irk.ru

Аннотация: Многие детали в машиностроении имеют формообразующие, которые условно можно разбить на прямолинейные и радиусные. Детали из закаленной стали 30ХГСА, разбиты на две группы: круглые и квадратные, шлифовали высокопористыми кругами (ВПК): 25AF46M10V5-ПО; 25AF46M10V5-ПО3; 25AF46M12V5-ПО; 25AF46M12V5-ПО3. Отклонение от плоскостности *EFE* оценивали основным показателем по ГОСТ 24642-81, характеризующим наибольшие величины. Установлено, что на радиусных участках контура по сравнению с прямолинейным возрастают медианы отклонений в 1,55-1,69 раза и снижаются меры рассеяния по квартильным широтам (КШ) до 1,67-4,25 раза. Относительно стабильности процесса с наилучшей стороны зарекомендовали ВПК с ПО3: при 10-той структуре КШ на обоих участках предсказаны одинаковыми, а при 12-той структуре на радиусном участке возросли в 1,67 раза. Для ПО в аналогичных условиях меры рассеяния усилились до 3-4,25 раза.

Ключевые слова: шлифование, отклонение от плоскостности, контура деталей, статистический метод, среднее, медиана, мера рассеяния.

Введение

Отклонение от плоскостности является фундаментальным показателем при проектировании и изготовлении любых деталей машин. Оно оказывает непосредственное влияние на пространственное расположение деталей, трудоемкость и точность сборки соединений и машин. Его чаще всего измеряют микрокатором [1] и на координатной машине [2, 3, 4]. Полученные результаты интерпретируются с помощью различных методов. Самым распространенным является метод наименьших квадратов. Он обеспечивает номинальную сумму квадратных ошибок измеренных точек от номинальной функции. Благодаря легкой реализации и высокой вычислительной эффективности широко используется в промышленности. Его основными недостатками является то, что он не гарантирует критерия минимальных зон [5] и обеспечивает лишь приближённые значения [6, 7]. В последнее время получил распространение метода минимальных зон, сущность которого заключается в минимизации максимальных расстояний между идеальными и фактическими плоскостями деталей [3, 5, 8].

Конфигурация контура плоских деталей чаще всего включает прямолинейные и радиусные участки. При разработке технологических рекомендаций на это не обращают внимания и только учитывают габаритные размеры шлифуемой детали [9].

Данное исследование посвящено изучению влияния контура плоских деталей из закаленной стали 30ХГСА на их макрогеометрию и выбору характеристик высокопористых кругов (ВПК) из электрокорунда с использованием статистических методов.

Методика экспериментального исследования

Опыты выполнены при следующих неизменных условиях: плоскошлифовальный станок модели 3Г71; материал детали – сталь 30ХГСА ($\sigma_в$=1000-1080 МПа); круги формы 1 с размерами 250×20×76 [10]; технологические параметры - скорость резания $v_к$=35 м/с, продольная подача $s_{пр}$=7 м/мин, поперечная подача $s_п$=1 мм/дв.ход, глубина резания t=0,015 мм, операционный припуск z=0,15 мм; СОЖ - 5%-ная эмульсия Аквол - 6 (ТУ 0258-00148843-98), подаваемая поливом на заготовку в количестве 7-10 л/мин; число параллельных опытов n=30. Переменные условия шлифования отражены кодом «*ijrv*», который удобно использовать при формализованной записи выходного параметра процесса. Здесь $i = \overline{1;2}$ - форма и размеры образцов: 1 - круглые диаметром D=40 мм и высотой H=40 мм; 2 - квадратные с размерами 40×40 мм и высотой H=40 мм. Оба типа образцов шлифуются по торцам. Индекс $j = \overline{1;4}$ отражает характеристику ВПК, изготовленных Лужским абразивным заводом (г. Луга): 1 – 25AF46M10V5-ПО; 2

– 25AF46M10V5-ПО3; 3 – 25AF46M12V5-ПО; 4 – 25AF46M12V5-ПО3. Индексом $r = \overline{1;3}$ обозначены показатели стабильности процесса: 1 - стандарты отклонений $(SD)_{ij}$; 2 - размахи наблюдений, 3 - квартильные широты $(КШ)_{ij}$, о которых подробнее изложено в (6) - (8) ниже.

Методика поиска основного показателя отклонений от плоскостности *EFE* [8], характеризующего их наибольшие величины, рассмотрена в работе [1].

Для анализа экспериментальных данных в работе используются статистические подходы, обусловленные стохастической природой процесса шлифования. Их достоинствами является возможность оценки надежности принимаемых решений, а также режущих способностей кругов не только по мерам положения, но и рассеяния. Вторая характеристика одномерного распределения частот наиболее важна при шлифовании ответственных деталей на настроенных станках с целью снижения вероятности брака. Полученные параметры точности формы поверхности представляют собой случайные величины (СВ), образующие независимые множества:

$$\{y_{ijv}\},\ \boldsymbol{i} = \overline{1;2},\ j = \overline{1;4},\ v = \overline{1;n}. \qquad (1)$$

В технических приложениях используют два направления статистических методов: параметрическое и непараметрическое (в частности, ранговое). Характеристиками одномерного распределения частот для (1) служат [1]: средние $\bar{y}_{ij} = y_{ij\bullet}$, стандарты отклонений $(SD)_{ij}$, размахи $R_{ij} = \left|y_{\max} - y_{\min}\right|_{ij}$ – для первого направления; медианы $\tilde{y}_{ij}$, квартильные широты $КШ_{ij} = \left|y_{0,75} - y_{0,25}\right|_{ij}$ – для второго направления. Первая из указанных частот характеризует меру положения (опорное значение) СВ, а последующие – меры рассеяния (прецизионность). Сдвиг между $\tilde{y}_{ij}$ и $y_{ij\bullet}$ свидетельствует об асимметрии (скошенности) кривых распределений [1]: $As_{ij} = \left[3(y_\bullet - \tilde{y})/SD\right]_{ij}, i = \overline{1;2}, j = \overline{1;4}$ Параметрический метод статистики используется в том случае, когда (1) обладают свойствами гомоскедастичности (синонимы - однородность или гомогенность дисперсий отклонений) и нормальности распределений. При нарушении этих ограничений рекомендуется, в частности, привлекать ранговый метод, который не связан с конкретным семейством распределений и его свойствами. В работе [11] изложена методика выбора статистического метода и последующий поиск ожидаемых средних $\hat{y}_{ij\bullet}$ и медиан $m\hat{y}_{ij},\ i = \overline{1;2}, j = \overline{1;4}$. На первом этапе для (1) проводится одномерный дисперсионный анализ (ОДА) на предмет установления факта значимого различия между уровнями мер положения, а на последующем - их множественной анализ, который завершается поиском ожидаемых аналогов для переменных $i = \overline{1;2}, j = \overline{1;4}$. Обработка наблюдений требует большого объёма вычислений и проведена в программной среде *Statistica* 6.1.478.0. Влияние непараметрического метода на меры положения оценивается медианными коэффициентами при неизменных $i = \overline{1;2}, j = \overline{1;4}$:

$$К_{мij} = (\tilde{y}/y_\bullet)_{ij}, \qquad (2)$$

$$\hat{К}_{мij} = (m\hat{y}/\hat{y}_\bullet)_{ij}. \qquad (3)$$

С учетом цели поставленного исследования введем поправочные коэффициенты, учитывающие влияние радиусных участков заготовки (*i*=1) на меры положения и рассеяния относительно деталей квадратной формы (*i*=2), принятой за базовую, при последовательной смене кругов $j = \overline{1;4}$ [1]:

$$К_j = (\tilde{y}_1/\tilde{y}_2)_j, \qquad (4)$$

$$\hat{К}_j = (m\hat{y}_1/m\hat{y}_2)_j, \qquad (5)$$

$$К_{стj1} = (SD_2/SD_1)_j, \qquad (6)$$

$$К_{стj2} = (R_2/R_1)_j, \qquad (7)$$

$$К_{стj3} = (КШ_2/КШ_1)_j \qquad (8)$$

Результаты и обсуждение

Результаты ОДА показали, что однородность дисперсий отклонена в полном объеме при шлифовании всеми кругами $j = \overline{1;4}$. Второе требование для использования параметрического метода о нормальном распределении (1) по критерию Шапиро-Уилка не обеспечено для всех случаев. В связи с этим было решено анализ полученных наблюдений вести с привлечением ранговых статистик. Правильность выбранного решения подтверждают опытные средние и медианы отклонений от плоскостности, приведенные в табл. 1.

Из нее видно, что различие между опытными средними и медианами для всех случаев находится в пределах одной категориальной величины (КВ) и отражено медианными коэффициентами $К_{мij}$ (2). Опытные и прогнозируемые меры положения и коэффициенты (2)-(5) совпали, поскольку влияние контура плоских деталей оказалось значимым.

Как видно из табл. 1 на радиусных участках контура деталей показатели EFE_1, $j = \overline{1;4}$ по сравнению с прямолинейными участками в 1,55 – 1,69 раза. При переходе с порообразователя ПО на ПО3 максимальные отклонения от плоскостности EFE_{max} от 10 до 12 максимальные отклонения от плоскостности EFE_{max} возрастают

от 1,21 до 1,27 раза. Это необходимо учитывать при проектировании шлифовальных операций, что наиболее просто реализовать при работе на станках с ЧПУ.

Таблица 1. Влияние формы деталей на меры положения и коэффициенты (2)-(5) по показателю EFE

Круг, j	Форма деталей i	$y_{ij\bullet}$, мкм (*TFE*)	$\tilde{y}_{ij}$, мкм (*TFE*)	$\hat{y}_{ij\bullet}$, мкм (*TFE*)	$m\hat{y}_{ij}$, мкм (*TFE*)	$K_{мij}$(2)	$\hat{K}_{Mij}$ (3)	K_{ij}(4)	$\hat{K}_{ij}$ (5)
1	1	14,67 (6)	13,50 (6)	14,67 (6)	13,50 (6)	0,92	0,92	1,69	1,69
	2	8,97 (5)	8,00 (5)	8,97 (5)	8,00 (5)	0,89	0,89	1,00	1,00
2	1	14,13 (6)	14,00 (6)	14,13 (6)	14,00 (6)	0,99	0,99	1,56	1,56
	2	9,43 (5)	9,00 (5)	9,43 (5)	9,00 (5)	0,95	0,95	1,00	1,00
3	1	18,55 (7)	16,50 (7)	18,55 (7)	16,50 (7)	0,89	0,89	1,65	1,65
	2	9,50 (5)	10,00 (6)	9,50 (5)	10,00 (6)	1,05	1,05	1,00	1,00
4	1	17,47 (7)	17,00 (7)	17,47 (7)	17,00 (7)	0,97	0,97	1,55	1,55
	2	10,80 (6)	11,00 (6)	10,80 (6)	11,00 (6)	1,02	1,02	1,00	1,00

Примечание. Круги j: 1 – 25AF46M10V5-ПО; 2 – 25AF46M10V5-ПО3; 3 – 25AF46M12V5-ПО; 4 – 25AF46M12V5-ПО3. В скобках указаны квалитеты точности по [9]

Таблица 2. Влияние конфигурации деталей на меры рассеяния и коэффициенты стабильности (6)-(8) по показателю EFE

Круг, j	Форма деталей, i	SD_{ij}	R_{ij}	КШ$_{ij}$	$K_{стijr}$		
					r=1 (6)	r=2 (7)	r=3 (8)
1	1	4,78	15,00	8,50	0,58	0,60	0,24
	2	2,76	9,00	2,00	1,00	1,00	1,00
2	1	1,41	5,00	2,00	1,34	1,60	1,00
	2	1,89	8,00	2,00	1,00	1,00	1,00
3	1	10,03	36,50	6,00	0,17	0,16	0,33
	2	1,74	6,00	2,00	1,00	1,00	1,00
4	1	4,29	17,00	5,00	0,54	0,47	0,60
	2	2,30	8,00	3,00	1,00	1,00	1,00

Примечание. Круги j: 1 – 25AF46M10V5-ПО; 2 – 25AF46M10V5-ПО3; 3 – 25AF46M12V5-ПО; 4 – 25AF46M12V5-ПО3

Меры рассеяния отклонений от плоскостности, приведенные в табл. 2, убедительно свидетельствуют, что они имеют ярко выраженную закономерность к росту при переходе от шлифования прямолинейных участков к радиусным. По квартильным широтам КШ, которые служат базовыми при использовании непараметрического метода статистики. Отмечено, что наибольшее влияние на прецизионность процесса оказал тип порообразователя при шлифовании криволинейных участков. ВПК 10-той структурой с порообразователем ПО3, обеспечили повышения стабильности процесса в четыре с лишним раза по сравнению с порообразующим ПО. При 12-той структуре ВПК эффект сохранился но снизился до 1,2 раза. Параметрические меры рассеяния: SD_{ij} и R_{ij} – на качественном уровне подтвердили ранее отмеченные закономерности.

Выводы

1. Показана целесообразность привлечения непараметрического метода для интерпретации наблюдений при маятниковом шлифовании закаленных деталей 30ХГСА, имеющих прямолинейный и радиусный контуры плоских поверхностей.

2. Установлено, что при переходе с прямолинейного контура на радиусный возрастают отклонения от плоскостности от 1,55 до 1,69 раза. При этом одновременно увеличиваются меры рассеяния до 4,25 раза. При переходе с порообразователя ПО на ПО3 максимальные отклонения от плоскостности EFE_{max} возрастают от 1,03 до 1,13 раза и при увеличении структуры от 10 до 12 максимальные отклонения от плоскостности EFE_{max} возрастают от 1,21 до 1,27 раза. Относительно, стабильности процесса с наилучшей стороны зарекомендовали ВПК с

ПО3: при 10-той структуре КШ на обоих участках предсказаны одинаковыми, а при 12-той структуре на радиусном участке возросли в 1,67 раза. Для ПО в аналогичных условиях меры рассеяния усилились до 3-4,25 раза.

Список литературы

1. *Солер Я.И., Нгуен В.К.* Прогнозирование эффективности шлифования кругами различной пористости из традиционных и новых абразивов по критерию точности формы пластин Р9М4К8// Вестник ИрГТУ, 2014. – № 11 (94). – С. 49-58.

2. *Lakota S., Gorog A.* Flatness measurement by multi-point methods and by scanning methods// Ad Alta: Journal of interdisciplinary research, 2011. – No.1. – P. 124-127.

3. *Ye R.F.* et al. Minimum zone evaluation of flatness error using an adaptive iterative strategy for coordinate measuring machines data// Advanced Materials Research, 2012. – No 472. – P. 25-29.

4. *Raghunandan R., Venkataswara Rao P.* Selection of an optimum sample size for flatness error estimation while using coordinate measuring machine// International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007. – No 47. – P. 477-482

5. *Nadolny K., Kaplonek W.* Analysis of flatness deviations for austenitic stainless steel workpieces after efficient surface machining// Measurement science review, 2014. – Vol. 14. – No. 4. – P. 240-212.

6. *Huang S.T., Fan K.C., Wu J.H.* A new minimum zone method for evaluating flatness errors// Precision engineering, 1993. –Vol. 15. – No. 1. – P. 25-32

7. *Sohyung Cho, Joon*-Young Kim Straightness and flatness evaluation using data envelopment analysis// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012. – Vol. 63. – P. 731-740.

8. ГОСТ 24642-81 Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения. Введ. 01.07.81. Взам. ГОСТ 10356-63. – М:. Изд-во стандартов, 1981. – 68с.

9. ГОСТ 24631-81. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения. Введ. 01.07.1981. Взам. ГОСТ 10356-63 (в части разд. III). – М:. Изд-во стандартов, 1981. – 14с.

10. ГОСТ Р 52781-2007. Круги шлифовальные и заточные. Технические условия. Введ. 29.11.2007. – М.: Стандартинформ. – 32 с.

11. *Hollander M., Wolfe D.A.* Nonparametric statistical methods, second edition. – Willy-Interscience, 1999. – 787 p.

EFFECT OF THE OUTLINE OF PLANE PARTS FROM HARDENED STEEL 30ChGSA ON MACROGEOMETRY WHILE PENDULUM GRINDING BY DIFFERENT POROUS WHEELS

Soler Y. I. [1], C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: solera@istu.irk.ru
Nguyen V. L[1]., postgraduate, e-mail: nhatle007@gmail.com
[1]Irkutsk Research National Technical University, 83 street Lermontov, Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract: Technological recommendations for provision of the specified form accuracy of parts were developed taking into account of the sizes of ground surface. In this study, a hypothesis about the effect of part shape-generating on flatness deviations EFE (GOST 24642-81) was tested. The experiments are carried out under the following conditions: v_c=35 m/s; s_{lo}=7 m/min; s_{tr}=1 mm/double pass; t=0.015 mm; z=0.15 mm; cutting cooling fluid - 5 percent Akvol–6 emulsion. The parts made from steel 30ChGSA (σ_{UST}=1080 MPa), with different configurations and sizes: circular-shaped with diameter D = 40 mm; rectilinear-shaped with sizes $B \times L$ = 40×40 mm, are ground on the circular end face by the high porous wheels (HPW) of type 01 250×25×76 mm (GOST R52781-2007): 25AF46M10V5-ПО; 25AF46M10V5-ПО3; 25AF46M12V5-ПО; 25AF46M12V5-ПО3. These wheels differ the pore-forming materials (ПО and ПО3) and the structure (10; 12). The stochastic nature of grinding predetermines the utility of attracting statistical methods for predicting the output parameters. In the conditions of violating normality and homoscedasticity of distributions interpretation of research data is done with a non-parametric method, wherein the one-dimensional frequency distributions medians and quartile latitudes are used. This paper establishes that the position measures increase 1.55-1.69 times and scattering measures by quartile latitudes decreases 1.67-4.25 times while grinding the circular-shaped parts in comparison with the rectilinear-shaped. The wheels with 10 structure were recommended to reduce the medians and HPW with pore-forming material ПО3 were chosen to improve the process stability.

Keywords: grinding, form accuracy, part configuration, statistical method, average, median, measure of dispersion.

УДК 621.923.1, 510.62

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 06Х14Н6Д2МВТ-Ш ПРИ ШЛИФОВАНИИ НИТРИДБОРОВЫМИ КРУГАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Я.И. СОЛЕР, кандидат техн. наук, доцент,
М.Т. НГУЕН, аспирант
(ИрНИТУ, г. Иркутск, Россия)
Солер Я.И. - 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: solera@istu.irk.ru

Аннотация: Процесс шлифования характеризуется нестабильностью, которую создает абразивный инструмент. В связи с этим выходные параметры процесса по отклонениям от плоскостности оценены с использованием статистических методов. С учетом отклонений наблюдений от гомоскедастичности и нормальности распределений акцент в исследовании сделан на ранговые статистики, характеристиками которых служат медианы и квартильные широты, отражающие соответственно меры положения и рассеяния. Двухпараметрическая оценка отклонений от плоскостности потребовала привлечения метода нечеткой логики, которая реализована в среде MATLAB с привлечением пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox. Последняя в данном исследовании реализована в условиях оптимизации шлифования плоских деталей 06Х14Н6Д2МВТ-Ш высокопористыми кругами (ВПК) CBN30 100 OVK27-КФ40, которые различались зернистостью: В76, В107, В126, В151. Нечеткая логика выявила, что по комплексной оценке точности формы шлифование следует вести ВПК с наименьшей зернистостью В76.

Ключевые слова: детали, шлифование, отклонение от плоскостности, статистический метод, среднее, медиана, нечеткая логика, функция желательности.

Введение. Технический прогресс в ведущих отраслях машиностроения: энергетическом, нефтяном, химическом, авиа-и ракетостроении, космической технике – в значительной степени обусловлен использованием в конструкциях машин и механизмов высокопрочных коррозионно-стойких сталей. В связи с постоянно возрастающими требованиями к надежности конструкций следует повышать качество деталей, соединений и машин.

Точность формы деталей является одной из важнейших характеристик, определяющей качество изготовления изделий машиностроения. Однако до сегодняшнего дня разработка методов управления макрогеометрией поверхностей деталей остается нерешенной проблемой. В связи с этим данное исследование посвящено выбору зернистости высокопористых кругов (ВПК) из кубического нитрида бора (КНБ, зарубежная аббревиатура – *CBN)* по отклонениям от плоскостности EFE_{max} [1], которые оценивались мерами положения (средними, медианами) и рассеяния (стандартами отклонений, размахами и квартильными широтами). Наличие двух характеристик выходного параметра процесса не позволяет решить данную проблему обычными статистическими методами. Для этой цели в исследовании использована нечеткая логика.

Методика экспериментального исследования. Натурные опыты проведены при следующих постоянных условиях: плоскошлифовальный станок модели 3Е711В; круги формы 1А1 с размерами 200×20×76×5 (мм), технологические параметры – скорость резания $v_k = 28$ м/с, продольная подача $s_{\text{пр}} = 6$ м/мин, поперечная подача $s_{\text{п}} = 4$ мм/дв.ход, глубина резания t=0,01мм, операционный припуск z =0,1 мм, СОЖ-5%-ая эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-0014842-98), подавая поливом на заготовку в количестве 7-10 л/мин; число дублирующих опытов n=30. Объект исследования – образцы из стали 06Х14Н6Д2МВТ-Ш с механическими свойствами: $\sigma_в = 1310 - 1400$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1210 - 1240$ МПа, $\delta = 12 - 14$ %, и размерами $B \times L \times H$ =60×60×60 мм, шлифуемые по торцу. Индекс $l = \overline{1;4}$ отражает характеристики высокопористых кругов (ВПК): 1-CBN30 В76 100 OVK27-КФ40; 2-CBN30 В107 100 OVK27-КФ40; 3-CBN30 В126 100 OVK27-КФ40; 4-CBN30 В151 100 OVK27-КФ40 [2,3], в которых только возрастают размеры зерен (зернистость) кубического нитрида бора от *B*76 до *B*151. Средства измерения и методика расчета показателя EFE_{max} приведены в работе [2].

Для реализации концепции нечеткой логики используются экспериментальные данные, полученные при шлифовании. Особенностью данного процесса является то, что абразивные зерна в инструменте имеют произвольную форму, хаотическое расположение в связке, разновысотность в радиальном направлении, различное

количество активных зерен и режущих кромок на единицу площади его контакта при врезании в заготовку. Изложенное позволяет рассматривать наблюдения непрерывными случайными величинами (СВ) и их поведение оценивать на базе теоретико-вероятностных подходов. Их реализация предполагает представление экспериментальных данных в виде независимых множеств $l = \overline{1;k}$:

$$\{y_{lv}\},\ v = \overline{1;n}, \qquad (1)$$

где v – количество параллельных опытов, которые желательно проводить с равным n (в исследовании принято n =30).

В инженерном анализе используется два метода математической статистики: параметрический и непараметрический (в частности, ранговый). В первом случае (1) должны удовлетворят требованиям гомоскедастичности и нормальности распределений. При их нарушении его оценки средних, стандартов отклонений и размахов могут потерять точность. В этом случае следует использовать ранговые статистики с одномерными распределениями частот в виде медиан и квартильных широт, которые не зависят от конкретного семейства распределений и не используют его свойства.

Нечеткая логика предназначена для создания математической модели на базе лингвистических рассуждений, в которых принципиальную роль играет язык и опыт экспертов. В этом смысле нечеткая логика равнозначна теории нечетких множеств, т.е. классов с неточными, размытыми границами. Теория нечетких множеств [3, 4] представляет собой обобщение и переосмысление важнейших направлений классической математики. При этом под нечёткими множествами A_l понимаются совокупности упорядоченных пар, составленных из элементов y_{lv} универсальных множеств $\{y_{lv}\}$ и соответствующих степеней принадлежности $\mu_A(y_{lv})$:

$$A_l = \{(y_{lv}, \mu_A(y_{lv})) \mid y_{lv} \in \{y_{lv}\}\},$$

где $\mu_{A_l}(y_{lv})$ – характеристические функции, указывающие на степень принадлежности y_{lv} к нечётким множествам A_l.

При реализации процесса моделирования нечеткой логики в среде *MATLAB* использован специальный пакет расширения *Fuzzy Logic Toolbox*. Он обладает простым и хорошо продуманным интерфейсом, позволяющим легко проектировать и диагностировать нечеткие модели [5-7].

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты одномерного дисперсионного анализа показали, что нарушена однородность дисперсий отклонений для кругов $l = \overline{1;4}$. Второе требование для использования параметрического метода относительно нормальности распределений для каждого из ВПК также не обеспечено. В связи с изложенным исследование проведено с привлечением непараметрического метода статистики, характеристиками одномерного распределения которого служат опытные медианы $\tilde{y}_l$ и квартильные широты КШ$_l$, $l = \overline{1;4}$, охватывающие 50 %-ов наблюдений (1). Полученные результаты наблюдений приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, наименьшую меру положения обеспечивает ВПК l =1 с квалитетом точности TFE6, на втором месте расположился круг l =4 (TFE7), третью позицию поделили круги l =2;3 (TFE7).

По снижению стабильности процесса круги расположились в следующей возрастающей последовательности l: 3;1;4;2.

Таблица 1. Входные данные для исследования влияния зернистости ВПК на показатель EFE_{max}

Круг $l = \overline{1;4}$.	$\tilde{y}_l$ (TFE), мкм	$КШ_l$, мкм
1	12 (6)	11
2	25 (8)	18
3	21,5 (8)	10
4	14,5 (7)	12
Примечание. Круги CBN30 100 OVK27-КФ40 l: 1- *B*76, 2-*B*107, 3-*B*126, 4-*B*151; в скобках представлены квалитеты точности [8]		

Таким образом, возникла ситуация, затрудняющая выбор зернистости ВПК. Для ее решения на рис. 1 создана нечеткая модель, в состав которой включены три переменные: входные – $\tilde{y}_l$, КШ$_l$ $l = \overline{1;4}$, отражающие варьирование зернистости в интервале [B76, B151], и одна выходная (качество шлифования).

Каждая из переменных представлена тремя функциями, которые при фаззификации зависят от соответствующего события [9]. В данном исследовании привлечен алгоритм Мамдани, в котором выбраны функции принадлежности (2) для термов: «*Good*» – z-подобная (*zmf),* «*Middle*» – пи-подобная (*pimf*) и «*Bad*» – z-подобная (*zmf*).

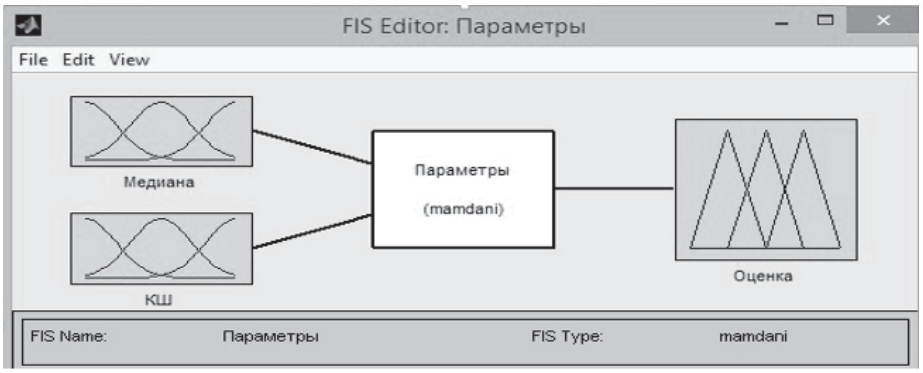


Рисунок 1 - Система для оценки качества деталей при варьировании зернистости кругов

При создании функций принадлежности для выходной переменной «Вывод» использованы три категории качества шлифованных деталей: «хорошее», «нормальное», «плохое» - с соответствующими термами: *zmf*, *pimf*, *smf*. Их шкалы и функции желательности представлены в табл. 2. При этом предполагаем, что функция желательности варьируется в интервале $d \in [0;1]$.

После создания функций принадлежности были определены правила нечетких рассуждений для разрабатываемой системы, которые созданы с помощью графического интерфейса *Rule Editor* и представлены в табл. 3.

Результаты комплексного анализа ВПК $l = \overline{1;4}$ по мерам положения и рассеяния с применением нечеткой логики иллюстрирует табл.4.

Из [11] известно, что снижение параметров отклонений от плоскостности ведет к повышению эксплуатационных свойств деталей машин. Из этих соображений наилучшими режущими свойствами обладает ВПК l =1 с наименьшей зернистостью В76.

Таблица 2 Параметры выхода модели в задаче поиска оптимальной зернистости по отклонениям плоскостности

Оценка	Выход		
лингвистическая	плохой	нормальный	хороший
числовая	[0,3; 0,4]	[0,3; 0,4; 0,6; 0,7]	[0,6; 0,7]

Таблица 3 Нечеткие правила для системы классификации деталей

Вариант	$\tilde{y}_l$	КШ$_l$	Вывод
1	*Good*	*Good*	Хорошо
2	*Good*	*Middle*	Хорошо
3	*Good*	*Bad*	Нормально
4	*Middle*	*Good*	Хорошо
5	*Middle*	*Middle*	Нормально
6	*Middle*	*Bad*	Плохо
7	*Bad*	*Good*	Нормально
8	*Bad*	*Middle*	Плохо
9	*Bad*	*Bad*	Плохо

Таблица 4 Результаты нечеткой логики по выбору зернистости ВПК по комплексной оценке точности формы деталей [10]

Круг l	Параметры отклонения от плоскостности	
	Функция желательности d_l	Лингвистическая оценка
1	0,826901408	очень хорошая
2	0,173098592	очень плохая
3	0,619645589	удовлетворительная
4	0,796743606	хорошая
Примечание. Зернистость *l*: 1- *B*76, 2-*B*107, 3-*B*126, 4-*B*151		

Выводы.

1. Статистические методы не позволяют реализовать многокритериальную оптимизацию процесса шлифования. Одним из вариантов решения этой проблемы является привлечение метода нечеткой логики.
2. В условиях нарушений гомоскедастичности и нормальности распределений экспериментальных данных для реализации нечеткой логики оправданным оказалось привлечение непараметрических оценок мер положения и рассеяния, к которым относятся медианы $\tilde{y}_l$ и квартильные широты КШ$_l$.
3. По результатам моделирования в среде MATLAB установлено, что ВПК CBN30 B76 100 OVK27-КФ40 при шлифовании деталей из стали 06Х14Н6Д2МВТ-Ш обеспечивает наилучшую точность формы по комплексной оценке. Использование данного круга повышает эффективность робастного проектирования шлифовальных операций, поскольку поиск базовых моделей множественного дисперсионного анализа ведется инструментами оптимальной характеристики.

Список литературы

1. ГОСТ 24642-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения. Введен 01.07.1984. М.: Изд-во стандартов. 45 с.
2. ГОСТ Р 53922-2010. Порошки алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора). Зернистость и зерновой состав шлифпорошков. Контроль зернового состава. Введ. 27.10.2005. М.: Стандартинформ. 15 с.
3. ГОСТ Р 52587-2006. Инструмент абразивный. Обозначения и методы измерения твердости. Введ. 16.11.2006. М.: Стандартинформ, 2007. 9 с.
4. *Солер Я.И., Лгалов В.В., Стрелков А.Б.* Оценка режущих свойств абразивных кругов различной пористости по критерию формы плоских деталей штампов Х12 // Металлообработка, 2012. №1(67). С.5 – 10.
5. *Ali Y.M., Zhang L.C.* Surface roughness prediction of ground components using a fuzzy logic approach. Journal of Materials Processing Technology, 1999. P. 561–568.
6. *Ali Y.M., Zhang L.C. A* fuzzy model for predicting burns in surface grinding of steel. Int J Mach Tool Manu 44, 2004. 563 p.
7. *Vyatchenin D.A.* Fuzzy methods of automatic classification: Monograph. Minsk: UP Tekhnoprint. 2004. 219 p.
8. ГОСТ 24643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения. Введен 01.07.1981. М:. Изд-во стандартов. 10 с
9. *Jaya A.S.M., Hashim S.Z.M., and Rahman M.N.A*. Fuzzy logic-based for predicting roughness performance of TiAlN coating // In Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), 2010 10th International Conference on. 2010. P 91-96.
10. *Мандров Б.И., Бакланов С.Д., Бакланов Д.Д.* и др. Применение функции желательности Харрингтона при экструзионной сварке листов из полиэтилена марки ПЭНД // Ползуновский альманах, 2012. № 1. С. 62-64.
11. *Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф.,* Панфилов Ю.В. и др. Инженерия поверхности деталей. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

IMPROVING THE FORM ACCURACY OF FLAT PARTS FROM STEEL 06Cr14Ni6Cu2MoWTi-SH WHILE GRINDING BY NITRIDE-BORON WHEELS USING FUZZY LOGIC

Soler Ya.I.[1], C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: solera@istu.irk.ru
Nguyen M.T.[1], postgraduate, e-mail: nhatle007@gmail.com
[1]Irkutsk Research National Technical University, 83 street Lermontov, Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract: Form accuracy is the most important quality characteristic of the part manufacture, which ensures high cutting ability of the abrasive tool. For this purpose, grinding parts from high corrosion resistant 06Cr14Ni6Cu2MoWTi-SH conducted highly porous wheels (HPW) from cubic boron nitride (foreign abbreviation CBN): CBN30 B76 100 OVK27- KF40, CBN30 B107 100 OVK27- KF40, CBN30 B126 100 OVK27-KF40, CBN30 B151 100 OVK27-KF40 on cutting mode: v_c=28 m/s, s_{lo} = 6 m/min, s_{tr}=4 mm/double pass, z=0.1 mm; the 5% Akvol–6 emulsion (TU 0258-024-0014842-98). As an indication of the flat part form highest rate of deviations from flatness (GOST 24642-81) is selected. The stochastic nature of the grinding process predestined expediency interpretation of experimental data with the assistance of statistical approaches. In the conditions of violating normality and homoscedasticity of distributions the data interpretation is made with an emphasis on a non-parametric method, wherein medians and quartile latitudes are used as one-dimensional frequency distribu-

tions. Two-parameter assessment of HPW cutting capacity did not allow them to identify the optimal granularity only using statistical approaches and required the involvement of a fuzzy logic method, which is implemented in MATLAB involving expansion pack Fuzzy Logic Toolbox. Fuzzy logic has revealed that by comprehensive assessment of the output parameter the research parts should grind by HPW CBN30 B76 100 OVK27-KF40.

Keywords: parts, grinding, flatness, a statistical method, mean, median, fuzzy logic, desirability function.

УДК 621.923.1

ОЦЕНКА РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ КРУГОВ NORTON ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПРИ МАЯТНИКОВОМ ШЛИФОВАНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1933Т2 ПО КРИТЕРИЮ МАКРОГЕОМЕТРИИ

Я.И. СОЛЕР, канд. техн. наук, доцент,
Н. Ч. КИЕН, аспирант,

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Солер Я.И. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИрНИТУ,
Tel.: 8(3952) 40-59-63, e-mail: solera@istu.irk.ru

Аннотация: Анализ шлифуемости высокопрочного сплава 1933Т2 ($\sigma_в$=480–490 МПа; $\sigma_{кр}$=175 МПа) по точности формы вели с использованием непараметрического метода статистики в виду неоднородности дисперсий отклонений и нарушений нормальности распределений наблюдений. Установлено, что при шлифовании плоских деталей 1933Т2 высокопористыми кругами (ВПК) NORTON различной зернистости: 46;60;80 (ISO 8486-1)-наибольшая точность формы предсказана при использовании ВПК 37С46К12VP а по стабильности процесса - ВПК той же характеристики, но при зернистости 60. Прецизионность деталей следует учитывать, в первую очередь, при их обработке на настроенных станках.

Ключевые слова: шлифование, отклонение от плоскостности, статистика, среднее, медиана, мера рассеяния, квартильная широта.

Шлифование – наиболее распространённый метод окончательной обработки ответственных поверхностей деталей машин, обеспечивающий получение высокой точности и качества обработанных поверхностей при удовлетворительной производительности. Точность обработки – это степень приближения действительных форм и размеров деталей к заданным на чертеже. Технологические рекомендации по регулированию макрогеометрии разработаны крайне слабо, тем более для шлифования деталей из алюминиевых сплавов. Это связано с засаливанием инструментов из карбида кремния нормальной пористости. Для повышения эффективности процесса в работе использованы высокопористые круги (ВПК) *Norton* из карбида кремния чёрного, позволяющие снизить их засаливание при шлифовании плоских деталей из высокопрочного сплава 1933Т2 ($\sigma_в$=480–490 МПа; $\sigma_{кр}$=175 МПа) [7]. В исследовании принята нормальная относительная геометрическая точность: отклонения от прямолинейности $EFL = 0{,}6T$, отклонения от плоскостности $EFE = 0{,}6T$ (ГОСТ 24643-81), где T – допуск на размер детали.

Статистические методы анализа экспериментальных данных. Для интерпретации наблюдений привлечены статистические подходы, целесообразность которых обусловлена стохастической природой шлифования. В этом случае параметры макрогеометрии представляют собой случайные величины (СВ) и рассматриваются независимыми множествами $e = \overline{1;k}$

$$\{y_{ev}\},\ v = \overline{1;n}, \qquad (1)$$

где v– количество параллельных опытов, которые желательно проводить с равным n.

Статистические методы разделяются на две группы: параметрическую и непараметрическую, в частности ранговую. Каждая из них имеет «свое поле» [2] для эффективного применения. Для первого метода необходимо выполнить два ограничения, накладываемые на СВ (1): однородность дисперсий отклонений и нормальность распределений. Изложенные требования при шлифовании чаще всего нарушаются в той или иной мере, что может сопровождаться значимым смещением оценок, доверительных границ и коэффициентов доверия [2]. В такой ситуации целесообразнее воспользоваться ранговыми критериями. Они не используют свойств конкретного семейства распределений, в силу чего «на своем поле» обладают преимуществами над своим конкурентом из нормальной теории. Статистические методы позволяют получить следующую информацию по одномерному распределению частот (1) [3; 4], ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002:

-по мерам положения (опорным значениям)

средним $\bar{y}_e = y_{e\bullet}$, (2)

медианам $\tilde{y}_e$; (3)

-по мерам рассеяния стандартам отклонений SD_e, (4)

размахам $R_e = (y_{\max} - y_{\min})_e$, (5)

квартильным широтам

$$КШ_e = (y_{0,75} - y_{0,25})_e \qquad (6)$$

-по мерам формы распределений, в частности, асимметрии (скошенности)

$$As_e = \left[3(\bar{y} - \tilde{y}) / SD\right]_e. \quad (7)$$

На оценках частот (2), (4), (5) базируется параметрический метод, а на (3), (6) – ранговые статистики. Выбор статистического метода и последующий поиск ожидаемых средних $\hat{y}_{e\bullet}$ и медиан $m\hat{y}_e$, $e = \overline{1;k}$ изложены в [5, 6]. В рамках данного исследования констатируем, что процедура статистической интерпретации (1) включает два последовательно выполняемых этапа: одномерный дисперсионный анализ (ОДА) на предмет установления факта значимого различия внутри множеств (2), а затем их множественный анализ,завершаемый поиском ожидаемых аналогов. В этом случае обработка (1) связана с большим объёмом вычислений и проведена в программой среде *Statistica* 6.1.478.0.

Для подтверждения гипотезы H_0 о нормальном распределении воспользовались критерием Шапиро – Уилка. Параметрический метод представляет наиболее строгие требования к однородности дисперсий отклонений СВ. Учитывая сказанное, H_0 относительно дисперсий вели по трём группам критериев ($p = \overline{1;3}$): 1 – Левене, 2 – Хартли, Кохрена, Бартлетта (программой объединены в одну группу), 3 – Брауна-Форсайта. При этом H_0 принимается, если количество решений f_0 в её пользу получено не менее двух.

Методика эксперимента. Опыты реализованы при следующих условиях: плоскошлифовальный станок модели 3Г71М; форма и размеры кругов – 01 250×20×76 по каталогу фирмы *Norton*; образцы с размерами $B \times B \times H$=40×40×47 мм, шлифуемые по площади $B \times B$ без выхаживания; технологические параметры – скорость резания $v_к$ = 35 м/с, продольная подача $S_{пр}$ =7 м/мин, поперечная подача S_n =1 мм/дв. ход, глубина резания t=0,015 мм, операционный припуск z=0,15 мм; СОЖ – 5%-ная эмульсия Аквол– 6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7–10 л/мин. Количество параллельных наблюдений в (1) задано $v = \overline{1;30}$. Выходные данные процесса представлены в общем виде как y_{ev}, где индекс $e = \overline{1;3}$ – код ВПК из карбида кремния черного: 1 – 37С46К12VP (базовый), 2 – 37С60К12VP, 3 – 37С80К12VP.

Отклонения от прямолинейности шлифованных поверхностей измерены микрокатором 2 – ИПМ (ТУ 2-234-229-89) в полярной системе координат, центром которой служит пересечение диагоналей квадрата 40×40 мм, в 12-ти сечениях $\varphi = [0^o; 330^o]$ через 30° по контуру детали. Они могут оказаться больше нуля, если точки измерения по периметру контура находятся выше начала координат, или меньше нуля при их расположении ниже начала координат. Эти отклонения именуются соответственно выпуклостью и вогнутостью (ГОСТ 24642-81). В дальнейшем отклонения от прямолинейности были представлены вещественной величиной EFL_φ и пересчитаны в отклонения от плоскостности *EFE* по методике [7]. По ГОСТ 24642-81 воспользовались основным показателем EFE_e который отражает наибольшие отклонения от прямолинейности. Его целесообразно использовать при оценке режущих свойств кругов.

Влияние непараметрического метода на меры положения оценивается медианными коэффициентами при неизменных $e = \overline{1;3}$:

$$\mathrm{K}_{\mathrm{M}(e)} = (\tilde{EFE} / EFE_\bullet)_e. \quad (8)$$

$$\hat{\mathrm{K}}_{\mathrm{M}(e)} = (m\hat{EFE} / \hat{EFE}_\bullet)_e \quad . \quad (9)$$

Оценку работоспособности кругов ($e = \overline{2;3}$) относительно базового 37С46К12VP (e=1) ведем для обеих характеристик одномерного распределения частот (1):

$$\mathrm{K} = (\tilde{y}_e / \tilde{y}_1) \ , \quad (10)$$

$$\hat{\mathrm{K}} = (m\hat{y}_e / m\hat{y}_1) \ , \quad (11)$$

$$\mathrm{K}_{CTej} = (C_{p1} / C_{pe}) \ , \quad (12)$$

где C_{p1} и C_{pe} соответственно индексы воспроизводимости для базового и альтернативных вариантов шлифования.

В окончательном виде (14) после преобразований [9] приводятся к виду:

$$\mathrm{K}_{CTe1} = SD_1 / SD_e \ , \quad (13)$$

$$\mathrm{K}_{CTe2} = R_1 / R_e , \quad (14)$$

$$\mathrm{K}_{CTe3} = \mathrm{КШ}_1 / \mathrm{КШ}_e . \quad (15)$$

Коэффициенты (9), (11), (13) – (15) необходимы для комплексной оценки режущих способностей абразивных кругов. Дополнительно опытный медианный коэффициент (10) позволяет оценить скошенность кривых распределений, а (12) - возможные ошибки при оценке режущих способностей кругов по опытным мерам положения.

Результаты исследования и их обсуждение. Итоги тестирования (1) на однородность дисперсий множеств $e = \overline{1;3}$ показали, что гипотезы H_0 относительно дисперсий отклонены по всем статистикам $p = \overline{1;3}$. Аналогичные результаты предсказаны по нормальному закону распределений. В связи с изложенным «своим полем» для интерпретации (1) выбран непараметрический метод.

Таблица 1. Влияние кругов на меру положения параметра EFE

Круг $e=\overline{1;3}$	$\bar{y}_e$,	$\tilde{y}_e$,	$\hat{y}_e$,	$m\hat{y}_e$,	$K_{M(e)}$ (8)	$\hat{K}_{M(e)}$ (9)	K (10)	$\hat{K}$ (11)
	мкм							
1	7,533(6)	7,000(6)	8,152(6)	7,500(6)	0,929	0,920	1,000	1,000
2	8,400(6)	8,000(6)	8,244(6)	7,667(6)	0,952	0,930	1,143	1,022
3	8,800(6)	8,000(6)	8,363(6)	8,000(6)	0,909	0,957	1,143	1,067
Примечание. Круг *e*: 1 – 37С46К12VP, 2 – 37С60К12VP, 3 – 37С80К12VP; в скобках указаны квалитеты точности по ГОСТу 24643-81								

В табл.1 представлены опытные и прогнозируемые меры положения и коэффициенты (8) - (11) для параметров макрогеометрии, полученных при шлифовании ВПК различной зернистости. Опытные меры положения позволяют определить сдвиг медиан относительно средних. Из табл.1 видно, что по опытным коэффициентам (8) кривые распределений для выходных параметров характеризуются положительной асимметрией. Сказанное обеспечивает повышение точности формы поверхностей в пределах квалитета *TEF*6. Ожидаемые меры положения в результате осреднения незначимых разностей отличаются от опытных аналогов, но все $m\hat{y}_{ej}$ предсказаны также меньше $\hat{y}_{ej}$, при неизменных $e=\overline{1;3}$, в силу чего (9) оказались меньше единицы: $\hat{K}_{M(e)}$ = 0,92-0,96. С позиций технологии шлифования важно отметить, что наименьшие опытные средние и медианы имеют место при использовании ВПК 37С46 с наиболее крупными зёрнами по *ISO*8486-1.

Окончательную оценку режущих свойств кругов ведём с учётом стабильности процесса. В табл.2 представлены меры рассеяния (4) - (6) и рассчитанные по ним коэффициенты стабильности (13) - (15). В условиях приоритетного использования непараметрические метода предпочтение отдано (6) и (15).

Как видно из табл.2, зависимость КШ$_e$=*f* (зернистость) носит экстремальный характер с минимумом при зернистости 60, которому соответствует наибольший коэффициент стабильности: 1,45 – для $К_{CT21}$, 1,13 – для $К_{CT22}$ и 1,5 – для $К_{CT23}$.На краях интервала наименьшую прецизионность показал ВПК с наиболее мелкими зёрнами 80.

Таблица 2. Оценка режущих способностей кругов по мерам рассеяния (4)-(6)

Круг $e=\overline{1;3}$	SD_e,	R_e,	$КШ_e$,	$К_{CTei}$		
	мкм			*i*=1 (13)	*i*=2 (14)	*i*=3 (15)
1	2,662	9,000	3,000	1,000	1,000	1,000
2	1,831	8,000	2,000	1,454	1,125	1,500
3	2,398	9,000	4,000	1,110	1,000	0,750
Примечание. Круг *e*: 1 – 37С46К12VP, 2 – 37С60К12VP, 3 – 37С80К12VP						

Список литературы

1. *Зубарев Ю.М*, Приемышев А. В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов. СПБ: Изд-во «Лань», 2010. 304с.

2. *Холлендер М., Вулф Д*. Непараметрические методы статистики / пер. с англ. М.: Финансы и статистика. 1983 – 506 с.

3. *Поллард Дж.* Справочник по вычислительным методам статистики / пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1982 – 344 с.

4. *Солер Я.И., Нгуен В.Л., Гуцол И.А*. Статистические подходы к микрорельефу плоских деталей из закаленной стали 08Х15Н5Д2Т при маятниковом шлифовании высокопористыми кругами из кубического нитрида бора и синтеркорунда // Вестник ИрГТУ, 2014. №4(87). С.33-40.

5. *Солер Я.И., Прокопьева А.В*. Исследование влияния выхаживания на микрорельеф пластин Р9М4К8 при шлифовании кругами из кубического нитрида бора // Обработка металлов (технология, оборудование и инструменты), 2009. №1 (42). С.24-27.

6. *Soler Ya.I., KazimirovD.Yu. Selecting* abrasive wheels for the plane grinding of airplane parts of the basis surface roughness// Russian engineering research, 2010, vol.30, №3, pp. 251 – 261.

7. Новые высокопрочные алюминиевых сплавы и материалы/ О.Г.Сенаторова, О.Е. Грушко. Е.А. Ткаченко [и др.] // ВИАМ [электронный ресурс]. URL: http://viam.ru/public/files/2006/2006-204669.pdf.(12.05.2015).

8. *Солер Я.И., Нгуен В.К.* Прогнозирование эффективности шлифования кругами различной

пористости из традиционных и новых абразивов по критерию точности формы пластин Р9М4К8 // Вестник ИрГТУ, 2014. № 11 (94).С. 49-58.

9. *Солер Я.И., Нгуен В.Л., Нгуен Ч.К.* Прогнозирование точности формы плоских деталей из закалённых сталей при маятниковом шлифовании периферией абразивного круга // Международный научно-исследовательский журнал, 2013. №12 (19). Ч.1. С.128-134.

ASSESSMENT CUTTING PROPERTIES WHEELS OF SILICON CARBIDE IN PENDULUM GRINDING ALUMINUM ALLOY 1933T2 BY MACROGEOMETRYCRITERION

Soler Ya.I, Candidate of technical sciences, Associate Professor, email: solera@istu.irk.ru
Nguyen C. K., Postgraduate Student, email: solera@istu.irk.ru

Abstract. 1933T2 alloy has high mechanical properties ($\sigma_в$ = 480-490 MPa, $\sigma_{кр}$ = 175 MPa) after heat treatment. It is widely used for the manufacture of parts of the internal set of the aircraft. Its abrasive grinding by normal porous tools is difficult in consequence of their blunting. At present NORTON high-porous wheels (HPW) from black silicon carbide 37C (46; 60; 80) K12VP were used. They differ in the grain by ISO8486-1. The analysis of HPW performance by flatness deviation was conducted using the non-parametric statistical methods because of that the experimental data was deviations from the normalcy of distribution and their dispersions were heterogeneous. In this case, the main characteristics of the one-dimensional frequency distribution are medians and quartile latitudes or mediums and standard deviations for the parametric method. Medians were lower than the averages in the range of flatness deviation TFE6 because of that the skewness was positive while grinding with cutting mode: cutting speed v_k =35 m/s; traverse $S_{пр}$ =7 m/min; cross feed S_n = 1 mm / d.s.; depth of cut t = 0,015 mm; the operating allowance z = 0,15 mm; coolant - a 5% emulsion Akvol- 6. It was established that during grinding parts from 1933T2 the highest form accuracy was predicted for HPW 37C46 and the smallest measure of scattering - for HPW 37C60.

Keywords: grinding, flatness, mean, statistics, median, measure of dispersion, quartile latitude.

УДК 621.923.1

ВЛИЯНИЕ СВЯЗКИ НИТРИДБОРОВЫХ КРУГОВ ВЫСОКОЙ ПОРИСТОСТИ НА ТОЧНОСТЬ ФОРМЫ БЫСТРОРЕЖУЩИХ ПЛАСТИН

Я.И. СОЛЕР, кандидат техн.наук, доцент,
А.И. ШУСТОВ, аспирант
(ИрНИТУ, г. Иркутск, Россия)

Солер Я.И. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: solera@istu.irk.ru

Аннотация. Данное исследование посвящено оценке качества быстрорежущих пластин (БП) сборных режущих инструментов по критерию точности формы. Для этого выбран параметр максимального отклонения от плоскостности EFE_{max}. Ранее технологический процесс изготовления БП завершали шлифованием кругами из традиционных абразивов, что затрудняло достижение необходимого качества. Решение этой проблемы найдено с производством высокопористых кругов (ВПК) с зернами из кубического нитрида бора (КНБ). Стохастический характер процесса шлифования обуславливает использование теоретико-вероятностных подходов. По результатам статистического анализа наблюдений выбран непараметрический метод. Даны рекомендации по выбору связки зерен ВПК из КНБ с точки зрения обеспечения стабильности процесса.

Ключевые слова: шлифование; связка; точность формы; статистика; среднее; медиана; мера положения; мера рассеяния

Введение

Важнейшим показателем уровня промышленного развития государства является возможность создания качественных изделий. Для машиностроения одним из самых значимых является показатель точности. Особые затруднения с точки зрения технологии вызывает обеспечение точности формы [1]. На машиностроительных предприятиях инструменты из быстрорежущих сталей составляют 70% от всего объема. Их работоспособность обеспечивается шлифованием рабочих поверхностей [2]. Точность формы БП оказывает прямое влияние на эксплуатационные характеристики работы деталей узлов, а также общий ресурс работы агрегата или машины [3]. Шлифование БП традиционными абразивами вело к структурным изменениям и снижению качества их поверхностей [4]. ВПК из КНБ позволяют улучшить качество процесса с увеличением его производительности на 65-70% [5]. Данное исследование направлено на выбор связки ВПК из КНБ с учетом мер положения и рассеяния. В работе принят допуск на отклонения от плоскостности *TFE* для нормальной относительной геометрической точности: $TFE=0{,}6T$ [6].

2. Методика экспериментального исследования

В работе использованы теоретико-вероятностные подходы, целесообразность которых обусловлена случайным характером геометрической формы зерен, хаотичным их расположением на режущей поверхности ВПК и разновысотностью в радиальном и осевом направлениях. Сказанное ведет к тому, что такие важнейшие показатели процесса резания, как геометрия зерен, толщины среза каждой режущей кромкой и их суммарное количество, участвующее в работе, необходимо рассматривать случайными величинами. Для ускорения рутинных вычислений и снижения риска ошибок использована программа *Statistica* 6.1.478.0. Привлечение статистики накладывает дополнительные требования к экспериментальным данным, которые необходимо представить в виде множеств $e = \overline{1;k}$:

$$\{y_{ev}\}, v = \overline{1;n}, \quad (1)$$

где v – количество параллельных опытов, которое целесообразно проводить с одинаковым n. Методика интерпретации экспериментальных данных с использованием методов статистики приведена в работах [7–9]. Их анализ показал, что множество наблюдений (1) не удовлетворяют требованиям гомоскедастичности и нормальности распределений. Это предопределяет привлечение непараметрического метода.

Статистические методы позволяют предсказать следующую информацию по одномерному распределению частот (1) [13–16]:

- по мерам положения (опорным значениям):

средним $\overline{y}_e = y_{e\bullet}$, (2)

медианам $\tilde{y}_e$; (3)

- по мерам рассеяния (прецизионности):

стандартам отклонений SD_e, (4)

размахам $R_e = \left(y_{\max} - y_{\min}\right)_e$, (5)

квартильным широтам

$КШ_e = \left(y_{0,75} - y_{0,25}\right)_e$; (6)

- по мерам формы распределений, в частности асимметрии (скошенности):

$$As_e = \left[3\left(\bar{y} - \tilde{y}\right) / SD\right]_e. \quad (7)$$

На частотах (2), (4), (5) базируется параметрический метод, а на (3), (6) – ранговые статистики.

Опыты вели при следующих неизменных условиях: плоскошлифовальный станок модели 3Е711В с вращением шпинделя по часовой стрелке; форма и размеры ВПК из КНБ [10] – 1 200×20×76; БП из стали Р9М4К8 (66–68 *HRC*); схема шлифования – периферией круга без выхаживающих ходов; скорость резания $v_к$ = 28 м/с; продольная подача $s_{пр}$ = 6 м/мин; глубина резания t = 0,01 мм; операционный припуск z = 0,1 мм; СОЖ – 5%-ная эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7–10 л/мин; количество параллельных наблюдений – n = 30 ($v = \overline{1;30}$); БП представляли собой образцы с размерами $D \times L$ = 36×30 мм, которые крепились непосредственно на магнитном столе станка и подвергались шлифованию по торцу. В условиях эксперимента индекс $e = \overline{1;2}$ в множестве (1) несет переменную информацию по характеристике ВПК относительно связки зерен КНБ: 1 – CBN30 B107 100 O V K27 – КФ40, 2 – CBN30 B107 100 O V C10 – КФ40, где за базовый вариант принята связка К27 (e=1). Методика измерений отклонений от прямолинейности рассмотрена в работе [11]. Она позволяет отыскать реальное расположение поверхности по наружному радиусу R = 20 мм (для сокращения записи принято за ρ = 1) относительно оси цилиндра в 12-ти сечениях $\varphi \in \left[0^\circ; 330^\circ\right]$ через 30°. Макроотклонения представлены вещественной переменной, характеризующей расстояния между выпуклыми и вогнутыми участками поверхности. Далее они преобразованы с учетом показателя отклонения от плоскостности по наибольшим величинам $EFE_{e\max}$ [12]. В условиях параметрического метода его вычисление ведем из выражения:

$$EFE_{e\max} = \left(\sum_{\varphi} EFE_{ev\varphi\max}\right) / 30 \cdot \quad (8)$$

В условиях непараметрических статистик (8) трансформируются от средних к медианам, которые ранжируются программой путем анализа последовательностей вида: $\left\{\left(EFE_e\right)_{\max}\right\}_v$, $v = \overline{1;30}$.

Влияние непараметрического метода на смещение медиан относительно средних количественно представлено медианными коэффициентами при одноименных $e = \overline{1;2}$:

$$K_{M(e)} = \left(\tilde{EFE} / EFE_\bullet\right)_e; \quad (9)$$

$$\hat{K}_{M(e)} = \left(m\hat{EFE} / \hat{EFE}_\bullet\right)_e. \quad (10)$$

Здесь (9) получено по опытным опорным значениям параметра (8), а (10) – по их ожидаемым аналогам. Коэффициенты (9) использованы для оценки асимметрии (7), а (10) – для уточнения параметрических моделей множественного дисперсионного анализа (МДА). Все вместе взятое позволяет более адекватно оценить режущие способности ВПК из КНБ, что и является конечной задачей данного исследования. С этой целью получены поправочные коэффициенты по точности формы относительно базового круга (e=1):

$$K_e = \left(m\hat{y}_2 / m\hat{y}_1\right)_e. \quad (11)$$

Количественную оценку стабильности процесса вели по коэффициентам K_{CTel}, в которых использованы различные меры рассеяния: SD_e (l = 1), R_e (l = 2) и $КШ_e$ (l = 3) при варьировании $e = \overline{1;2}$:

$$K_{CTe1} = SD_1 / SD_2, \quad (12)$$

$$K_{CTe2} = R_1 / R_2, \quad (13)$$

$$K_{CTe3} = КШ_1 / КШ_2. \quad (14)$$

Если (12)–(13) предсказаны меньше единицы, то прецизионность параметра (8) для базового варианта e=1 оказалась выше, чем для альтернативного, а в противном случае – наоборот.

Результаты и обсуждение

В таблице представлены ожидаемые опорные значения отклонений от плоскостности при шлифовании БП кругами $e = \overline{1;2}$, в скобках – квалитеты точности *TFE* [12], а также меры рассеяния (4)-(6) и коэффициенты стабильности (12)-(14). В условиях приоритетного использования непараметрического метода преимущество имеют инструменты, при работе которых формируется положительная асимметрия, т.к. в этом случае опытные медианы (3) оказались меньше средних (2), что благоприятно влияет на точность. Для обоих инструментов $e = \overline{1;2}$ выявлена положительная скошенность, причем снижение медиан относительно средних происходит на одну категориальную величину: $\overline{EFE}_1$=19,77(8), $\tilde{EFE}_1$=15,00(7) и $\overline{EFE}_2$=16,60(8), $\tilde{EFE}_1$=16,00(7). По ожидаемым опорным значениям оба круга признаны равнозначными с общей медианой $m\hat{EFE}_{\max\bullet}$ = 15,50 мкм.

Таблица 1. Влияние связки зерен на ожидаемые меры положения параметров $EFE_{max\ e}$ и коэффициенты (9)-(14)

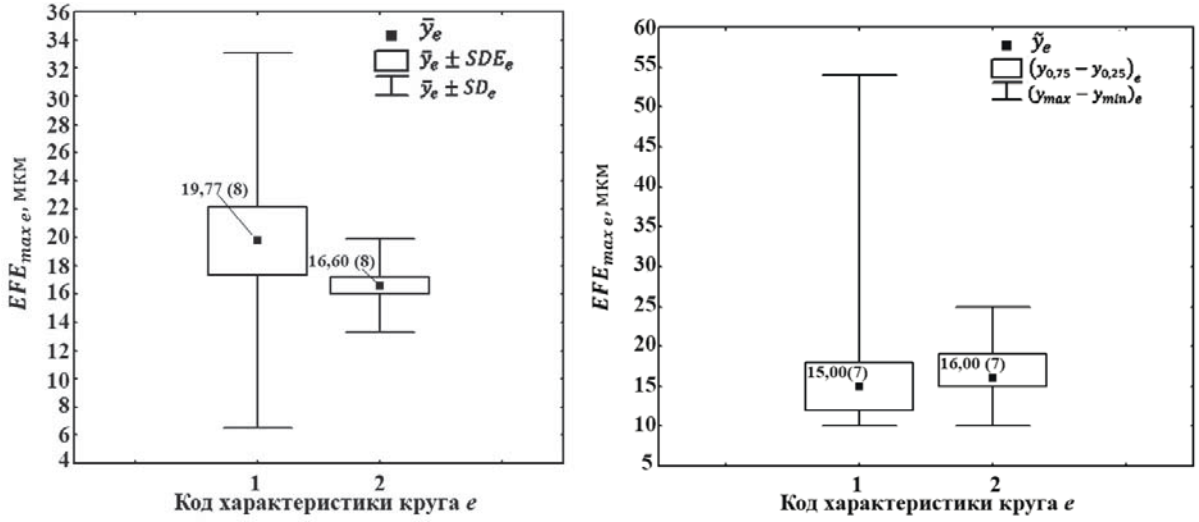
Круг e	$EFE_{max\ e}$ (*TFE*), мкм		As_e (7)	$K_{M(e)}$ (9)	$\hat{K}_{M(e)}$ (10)	K_e (11)	SD_e (4)	R_e (5)	КШ$_e$ (6)	K_{CTe1} (12)	K_{CTe2} (13)	K_{CTe3} (14)
	$\hat{y}_\bullet$	$m\hat{y}$										
1	18,18(8)	15,50(7)	+	0,76	0,85	1,00	13,28	44	6,25	1,00	1,00	1,00
2	18,18(8)	15,50(7)	+	0,96	0,85	1,00	3,31	15	4,00	4,00	2,93	1,56

Рисунок наглядно иллюстрирует одномерные распределения частот (2)-(6) для обоих методов статистики, характеризующих условия формирования показателя (8). С этой целью программа использует систему стандартных обозначений: «квадратом» выделены опытные опорные значения: средних $\bar{y}_e$ (а) и медиан $\tilde{y}_e$(б); остальные идентичные обозначения несут разную смысловую нагрузку. На рис. 1,а «прямоугольник» ограничивает рассеяние стандартов ошибки, а «усики»–стандартов отклонений. На рис.1,б они характеризуют (5) и (6). Совместно с таблицей рисунок свидетельствует об увеличении стабильности формирования отклонения от плоскостности при шлифовании инструментом e=2 со связкой С10. В результате имеем уменьшение стандартов отклонений (4) в 4 раза, размахов (5) – в 2,93 раза, квартильных широт (6) – в 1,56 раз. Как видим, рекомендации по выбору инструментов с учетом стабильности их работы дают однозначную оценку в пользу кругов CBN30 B107 100 O V C10 – КФ40, хотя результаты по мерам положения предсказаны практически равнозначными.

Выводы

1. Установлено, что по прогнозируемым мерам положения связки К27 и С10 признаны равнозначными по параметру отклонения от плоскостности.

2. БП Р9М4К8 рекомендуется шлифовать ВПК CBN30 B107 100 O V C10 – КФ40, который обеспечивает наибольшую стабильность процесса по квартильным широтам и повышает выход годных деталей при работе на настроенных станках.



а) б)

Рисунок 1 - Влияние характеристики кругов на одномерные распределения частот параметра $EFE_{max\ e}$ для параметрического (а) и непараметрического (б) методов

Список литературы

1. *Дальский А.М., Базров Б.М., Васильев Е.С. и др.* Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / под ред. А.М. Дальского. М.: МАИ, 2000. 364 с.

2. *Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф.* Технология шлифования в машиностроении / под общ. ред. З.И. Кремня. СПб.: Политехника, 2007. 424 с.

3. *Зубарев Ю.М.* Современные инструментальные материалы. СПб.: Лань, 2008. 224 с.

4. *Геллер Ю.А.* Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 527 с.

5. *Старков В.К.* Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.

6. ГОСТ 24643-81. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения. Взамен ГОСТ 10356-63 (в части разд. 3). Введ. 01.07.1981. М.: Изд-во стандартов, 1981. 14 с.

7. *Солер Я.И., Прокопьева А.В.* Исследование влияния выхаживания на микрорельеф поверхности режущих пластин Р9М4К8 при шлифовании кругами из кубического нитрида бора // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты), 2009. № 1 (42). С. 24-27.

8. *Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu.* Selecting abrasive wheels for the plane grinding of Airplane Part of the Basic of surface Roughness // Russian Engineering Research. 2010. V. 30. I. 3. P. 251-261.

9. *Солер Я.И., Шустов А.И.* Прогнозирование шероховатости поверхности инструментальных сталей при плоском шлифовании нитридборовыми кругами высокой пористости // Международный научно-исследовательский журнал, 2013. №10 (17). Ч.2. С.81-86.

10. ГОСТ Р 52781-2007. Круги шлифовальные и заточные. Технические условия. Введ. 29.11.2007. М.: Стандартинформ. 32 с.

11. *Солер Я.И., Лгалов В.В., Стрелков А.Б.* Оценка режущих свойств абразивных кругов различной пористости по критерию точности формы плоских деталей штампов из стали Х12 // Металлообработка, 2012. № 1 (67). С. 5-10.

12. ГОСТ 24643-81. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения. Взамен ГОСТ 10356-63 (в части разд. 3). Введ. 01.07.1981. М.: Изд-во стандартов, 1981. 14 с.

13. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. Введ. 01.11.2002. М.: Изд-во стандартов, 2002. 58 с.

14. *Поллард Дж.* Справочник по вычислительным методам статистики / пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1982. 344 с.

15. *Уиллер Д., Чамберс Д.* Статистическое управление процессами. / пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. 469 с.

16. *Hollander M., Wolfe D.A.* Nonparametric statistical methods, Second Edition. Wiley-Interscience, 1999. 787 p.

SHAPE ACCURACY ANALYSIS OF COUPLANT OF HIGH-POROUS CUBIC NITRIDE BORON WHEELS FOR HIGH-SPEED STEEL PLATES

Soler Ya.I., C.Sc (Engineering), Associate Professor, e-mail: solera@istu.irk.ru
Shustov A.I., Postgraduate student, e-mail: a.istu.edu@gmail.com

Irkutsk National Research Technical University, 83 street Lermontova, Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract. Grinding is a major process that determines endurance and workability of machine tools, therefore grinding is often a completion phase of an engineering tool production. In mechanical engineering, high-speed steels (HSS) W9Mo4Co8 (W=9%, Mo=4%, Co=8%; σ_t = 960 MPa, KCU = 80 kJ/m2) are referred to hard-to-machine materials due to the high content of carbide-forming elements. Grinding wheels made from traditional abrasives cause such major surface defects. Use of cubic nitride-boron (CBN) abrasive wheels might solve the problem. As HSS is a high alloyed steel, another advantage of CBN is their chemical resistance that makes it possible to grind avoiding adhesive and diffusion grain abrasive wear. In this paper we have estimated cutting abilities of CBN-wheels by their couplant to provide the highest surface quality and grinding stability. The calculation of the shape accuracy exponent EFE_{max} are perfomed by medians. The K27 and C10 couplants are found as equivalent for the plate shape accuracy. However most stability of process is able with the CBN30 B107 100 O V C10 – KF40 wheel.

Keywords: grinding; couplant; shape accuracy; statistics; average; median; measure of position; measure of dispertion

УДК 621.923.1

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ КРУГАМИ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Я.И. СОЛЕР, канд. техн. наук, доцент,
А.Б. СТРЕЛКОВ, канд. техн. наук, доцент,
Е.О. РЕПЕЙ, студент

Солер Я.И. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Аннотация: В настоящее время разработаны различные алгоритмы для адаптивного управления процессом шлифования. Однако отсутствует информационная база, на основе которой возможно автоматизированное управление данным процессом. В машиностроении активно внедряется новая концепция, известная под названием «метод робастного проектирования». Она исключает значительную часть интуитивных решений и трудоёмких натурных испытаний. В данной работе реализован один из этапов данной концепции для плоского шлифования по критериям микрорельефа и точности формы с учетом снимаемого припуска. Это позволяет исключает значительную часть интуитивных решений и трудоёмких натурных испытаний на этапе проектирования операций шлифования.

Ключевые слова: робастное проектирование, шлифование нитридборовым кругом, качество поверхности, многопроходное шлифование, многокритериальная оптимизация.

Высокопрочная коррозионно-стойкая сталь 13Х15Н4АМ3 (ВНС-5): $\sigma_в = 1390 - 1650$ МПа, $\delta = 15\%$, $E = 220$ МПа - относится к переходному аустенитно-мартенситному классу и используется в авиационной промышленности для изготовления ответственных высоконагруженных деталей летательных аппаратов, подверженных при эксплуатации атмосферным воздействиям. На окончательном этапе изготовления этих деталей широкое распространение получило плоское шлифование.

Традиционные методы экспериментального нахождения оптимума функций нескольких переменных $y=f(A, B,C,D,\ldots, Z)$ предлагают последовательное изучение частных зависимостей – $y=f(A)$, $y=f(B)$, …. Недостатком такого подхода является невозможность учесть взаимодействие факторов. Одновременно используются обобщенные показатели, которые не позволяют варьировать значимость отдельных выходных параметров с учетом технологических требований.

В [1] для множественной оптимизации поверхности отклика предложено использовать функцию желательности (*desirability*):

$$d = (d_1^{\Re_1} \cdot d_2^{\Re_2} \cdot \ldots \cdot d_n^{\Re_n}) = \left(\prod_{k=1}^{w} d_k^{\Re} \right)^{1/\sum \Re} \qquad (1)$$

где d -интегральная (полная) функция желательности для всех целевых функций, включённых в оптимизацию технологического процесса; d_k, $k = \overline{1; w}$ - дифференциальная функция желательности k-ой целевой функции y_k; $\Re = \overline{1;5}$ - ранги, присваиваемые целевым функциям с учётом их важности в обеспечении качества продукции.

Для автоматизированного поиска дифференциальных функций d_k используются модели I многомерного дисперсионного анализа (МДА) [2]. Оптимизацию каждой ожидаемой средней отклика можно реализовать в пространстве наблюдений следующими кусочно-непрерывными функциями в зависимости от поставленной цели:

а) минимум

$$\left.\begin{array}{ll} d_k = 1{,}0 & \hat{y}_k \le y_{k\,min}, \\ d_k = \left[\dfrac{y_{k\,max} - \hat{y}_k}{y_{k\,max} - y_{k\,min}} \right]^n & y_{k\,min} < \hat{y}_k < y_{k\,max}, \\ d_k = 0{,}0 & \hat{y}_k \ge y_{k\,max}. \end{array}\right\} \qquad (2)$$

б) максимум

$$\left.\begin{array}{ll} d_k = 0{,}0 & \hat{y}_k \le y_{k\,min}, \\ d_k = \left[\dfrac{\hat{y}_k - y_{k\,min}}{y_{k\,max} - y_{k\,min}} \right]^n & y_{k\,\min} < \hat{y}_k < y_{k\,max}, \\ d_k = 1{,}0 & \hat{y}_k \ge y_{k\,max}; \end{array}\right\} \qquad (3)$$

в) заданное значение целевой функции t_k (t-от начальной буквы в слове *target*)

$$\left.\begin{array}{ll} d_k = 0{,}0 & \hat{y}_k \le y_{k\,min}, \\ d_k = \left[\dfrac{\hat{y}_k - y_{k\,min}}{t_k - y_{k\,min}} \right]^n & y_{k\,min} < \hat{y}_k \le t_k, \\ d_k = 1{,}0 & \hat{y}_k = t_k; \end{array}\right\} \qquad (4)$$

или

$$\left.\begin{array}{ll} d_k = 0{,}0 & \hat{y}_k \geq y_{k\,max}, \\ d_k = \left[\dfrac{y_{k\,max} - \hat{y}_k}{y_{k\,max} - t_k}\right]^n & t_k < \hat{y}_k < y_{k\,max} \\ d_k = 1{,}0 & \hat{y}_k = t_k; \end{array}\right\} \quad (5)$$

г) диапазон (*is in range*)

$$\left.\begin{array}{ll} d_k = 0{,}0 & \hat{y}_k \leq y_{k\,min}, \\ d_k = 1{,}0 & y_{k\,min} < \hat{y}_k < y_{k\,max}, \\ d_k = 0{,}0 & \hat{y}_k \geq y_{k\,max}. \end{array}\right\} \quad (6)$$

В (2)-(6) приняты следующие обозначения: $\hat{y}_k$ – прогнозируемая средняя *k*-ой целевой функции; $y_{k\,min}, y_{k\,max}$ – соответственно наименьшее и наибольшее наблюдения, прогнозируемые в пространстве *U* изучаемой целевой функции; *n* – показатель степени функции *weight* для *k*-го параметра качества изделия.

Поиск оптимума целевой функции ведется в подпространстве $U_1 \subset U$ с использованием линейной регрессии.

Задание целей оптимизации для независимых переменных может развиваться по сценариям:

1. С использованием функции «*target*» приближение фактора к заданной цели не всегда обеспечивается идеально и тогда приводит к двум самостоятельным решениям (4) и (5), из которых выбирается наилучшее.

2. Функция «*is equal to*» позволяет строго выдержать заданное значение фактора.

Реализацию зависимостей (1)-(6) вели с привлечением программы *Stat-Ease Design-Expert* 9.0.4.1, которая ведёт поиск экстремума целевых функций методом симплекс-планирования. Для движения по градиенту автоматически просчитываются координаты вершин симплексов модели I МДА.

Опыты проведены при следующих неизменных условиях: станок модели 3Г71; круги 1А1 200×20×76×5 *CBN* 30 160/125 СТ1 К27 100 (ОАО «НПК «Абразивы и Шлифование», г. Санкт-Петербург); шлифуемая поверхность – торец круглой заготовки с размерами *D*×*L*=35×40 мм, скорость резания $v_к$=28 м/с; СОЖ-5%-ная эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148843-98) с поливом на деталь в количестве 7-10 л/мин. Системное проектирование велось с помощью матрицы полного факторного эксперимента, приведенной в табл.1.

Таблица 1

Уровни факторов	Факторы			
	$s_{пр}$, м/мин. (*A*)	$s_п$, мм/дв.х. (*B*)	*t* , мм (*C*)	*z,* мм (*D*)
+1,00	8,2	4,50	0,020	0,255
0,00	6,0	3,00	0,015	0,200
-1,00	3,8	1,75	0,010	0,145
Примечание. $s_{пр}$- продольная подача; $s_п$- поперечная подача; *t*-глубина резания; *z*- операционный припуск				

Уровни варьирования межпереходного припуска, с учётом этапа обработки поверхности: *D*=-1,0 – «*equal to*»; $D \in [-0{,}2; +0{,}2]$ - «*in range*»; *D*=+1,0 – «*equal to*».

Для остальных независимых и выходных параметров процесса приняты следующие начальные условия:

- факторы $(A,B,C) \in [-1{,}0; +1{,}0]$ т.е. на всем пространстве ПФЭ;

- выходные параметры R_{a2},R_{max2} (R_q, R_z, S_m)$_{1,2}$ могут принимать любые значения в пространстве *U* без ограничений;

- относительные опорные длины профиля t_p, $p = \overline{10;50}\%$, заданы «*maximize*»;

- для отклонений от прямолинейности $EFL_{\varphi;1}$, $\varphi = \overline{0°;330°}$ цель поиска представлена с учётом вида погрешности:

$EFL_\varphi < 0$ – "maximize" для выпуклости,

$EFL_\varphi > 0$ – "minimize" для вогнутостей,

$EFL_\varphi \in [-y_i; +y_i]$ – "is target 0";

Для нагруженных деталей авиационной техники, испытывающих знакопеременные нагрузки, наиболее значимыми являются параметры R_{max} и R_a. Экспериментально установлено, что размах наблюдений R_{max} принадлежит множеству $U_1 \in [0{,}37; 4{,}63]$ мкм, а для R_a - $U_2 \in [0{,}06; 1{,}32]$ мкм. В связи с этим поставлена задача отыскать условия шлифования, обеспечивающие прогнозируемые средние $\hat{R}_{\max}$ и $\hat{R}_a$ в подпространствах $U_{1,2} \subset U$ для каждой целевой функции «*is target*»: для $\hat{R}_{\max}$ – 4,0* мкм; для $\hat{R}_a$ – 0,8* мкм и $\hat{EFE} \leq 10$ мкм (*TFE*6).

Таблица 2. Варианты и результаты оптимизации

$\frac{D}{d}$	Технологические факторы	Прогнозируемые параметры
$\frac{D=-1}{0{,}5198}$	$s_{пр}$=6,39 м/мин (A=0,177); $s_п$=3,02 мм/ дв. ход (B=-0,078); t=0,01 мм (C=-1,0); z=0,145 мм (D=-1,0)	$\hat{R}_a$ 0,8 (0,8*); $\hat{R}_z$ 2,89 (3,2*); $\hat{R}_{max}$ 3,6 (4,0*); $\hat{t}_{10}$ 1,24; $\hat{t}_{20}$ 4,42; $\hat{t}_{30}$ 8,08; $\hat{t}_{40}$ 23,65; $\hat{t}_{50}$ 44,62; $\hat{EFE}$ 7,98 (*TFE*6)
$\frac{D\in[-0{,}2;+0{,}2]}{0{,}5282}$	$s_{пр}$=8,2 м/мин (A=1,0); $s_п$=1,9 мм/ дв. ход (B=-0,894); t=0,02 мм (C=1,0); z=0,20 мм (D=0,0)	$\hat{R}_a$ 0,75 (0,8*); $\hat{R}_z$ 3,03 (3,2*); $\hat{R}_{max}$ 3,86 (4,0*); $\hat{t}_{10}$ 1,4; $\hat{t}_{20}$ 4,35; $\hat{t}_{30}$ 8,53; $\hat{t}_{40}$ 24,55; $\hat{t}_{50}$ 43,19; $\hat{EFE}$ 7,41 (*TFE*6)
$\frac{D=+1}{0{,}5130}$	$s_{пр}$=4,54 м/мин (A=-0,663); $s_п$=3,11 мм/ дв. ход (B=-0,009); t=0,019 (C=0,848); z=0,255 мм (D=1,0)	$\hat{R}_a$ 0,8 (0,8*); $\hat{R}_z$ 3,0 (3,2*); $\hat{R}_{max}$ 3,92 (4,0*); $\hat{t}_{10}$ 1,42; $\hat{t}_{20}$ 3,98; $\hat{t}_{30}$ 11,01; $\hat{t}_{40}$ 31,36; $\hat{t}_{50}$ 53,0; $\hat{EFE}$ 9,02 (*TFE*6)
Примечания 1. «*» - категориальные величины шероховатостей по ГОСТ 2789-73. 2. Относительные опорные длины t_p в %, а остальные параметры в мкм		

Среди полученных решений были отобраны те, которые удовлетворяют условиям: $\hat{R}_a \in (0{,}63^*;0{,}8^*]$ мкм; $\hat{R}_{max} \in (0{,}32^*;4{,}0^*]$ мкм. Были выявлены следующие решения: D=-1,0 - два из 2-х предложенных программой; $D \in [-0{,}2;0{,}2]$ - восемь из 8-ми имеющихся решений; D=1,0 - три из 5-ти возможных.

Решение при D=-1,0 подтверждает результаты о целесообразности шлифования абсолютно жёстких деталей с минимальным операционным припуском, полученным в работе [3]. При этом очень близко совпали значения технологических параметров. Однако многокритеральная оптимизация процесса шлифования выявила, что в определённом диапазоне припуск можно повысить за счёт увеличения технологических параметров. С этих позиций наиболее оптимальным является решение при $D \in [-0{,}2;0{,}2]$ (табл.2), которое не только обеспечивает наибольшее значение функции желательности и наименьшее отклонение от плоскостности (*TFE* 6), но и снижает вероятность появления прижогов [4] и волнистости [5] на поверхности детали благодаря большой величине продольной подачи. Одновременно следует отметить высокую производительность данного режима, позволяющего работать с максимальной глубиной резания.

Из табл.2 наглядно видно, что при шлифовании абсолютно жёстких деталей целесообразно назначать минимально допустимые операционные припуски. При требованиях к точности формы *TFE*6 считаем, что увеличение припуска D до +1,0 нецелесообразно, т.к. удлиняет процесс шлифования из-за снижения технологических параметров и возрастания величины операционного припуска.

Выводы

1. Реализована многокритериальная оптимизация процесса шлифования по параметрам микро- и макрогеометрии на основе моделей I многомерного дисперсионного анализа с учетом служебного назначения детали и многопроходности съёма припуска.
2. Реализована инновационная концепция робастного проектирования, которая для снижения трудоемкости и сроков технологической подготовки производства предлагает перенести акцент получения годных деталей со стадии изготовления на этап проектирования процесса.

Список литературы

1. *Myers R. H.*, Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments / R.H. Myers, D. C. Montgomery. New York: Wiley, 2002. p. 824.
2. *Солер Я.И.* Поиск моделей дисперсионного анализа для прогнозирования микрорельефа плоской поверхности деталей из стали ВНС-5 при *CBN*-шлифовании / Я.И. Солер, А.Б. Стрелков // Современные технологии в машиностроении: Сб.ст. XI Междун. НПК. Пенза: АНОО «ПДЗ». С.83 – 86.
3. Исследование влияния операционного припуска при CBN-шлифовании деталей из стали 13Х15Н4АМ3 различной податливости по

критериям микро- и макрогеометрии / Я.И. Солер, А.Б. Стрелков, Е.О. Репей, А.В. Прокопьева // Новые материалы и технологии в машиностроении: Сб. ст. XIX -ой МНТ Интернет К. – Брянск: БГТИА, 2014. С.116-123.

4. *Солер Я.И.* Моделирование теплофизики плоского шлифования / Я.И.Солер, Д.Ю. Казимиров // Проблемы машиностроения и надежности ма-шин. 2005. - №5. - С.56 – 62.

5. *Nobuhito Y.* Effect of Wheel Revolutional Speed on Striped Pattern on Surfaces Finished by High-speed Reciprocation Grinding / Nobuhito Y., Tsunemoto K., Katsuo S. // Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium, №2, 2001, pp.446 - 450.

MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF STRATEGY OF FLATE GRINDING WITH CUBIC NITRIDE BORON WHEELS FOR CORROSION-RESISTANT STEEL PARTS

Soler Ya.I., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: *solera@istu.irk.ru*
Strelkov A.B., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: *AlexejST@gmail.com*
Repey E.O., Student (Engineering), e-mail: *kat_dacic@mail.ru*

Irkutsk National Research Technical University, 83 street Lermontova, Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract. At present, there are various algorithms for adaptive directing of grinding process. However, the information base is not exist for automatically directing this one. There is an innovation of new conception as known as “robust design method” in up-to-date mechanical engineering. Robust design eliminates most of intuitive decisions and labor-intensive full-scale experiments. This one includes three stage: the system designing (quality control at designing of technology process); the parametric designing (quality control at production stage) and the quality designing. The quality control of machine part takes from second to first stage at robust design. Therefore, products have a less laboriousness of producing and high competitiveness in market economy. Nevertheless, the system designing has a lower level of development than the parametric designing, so it is necessary to additional researches. The base of the system designing is an active experiment with three and more levels of variation of technological parameters. Multidimensional dispersion analysis with nonrandom factors makes it possible to interpret the observations. Multilevel matrix of designed experiment promotes higher robustness of designing of technology process. It enable to carry out multicriteria optimization of grinding process taking into account constructional and technological signs. This paper aim to elaboration of the first stage of robust design.

Keywords: robust design; CBN grinding; surface quality; multistep grinding; multicriteria optimization

УДК 678.067

ТЕРМООКСИДИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

ПИЧХИДЗЕ С.Я[1]., доктор техн. наук, профессор,
ТАГАНОВА В.А[2]., канд. техн. наук
(СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, БИТТУ, г. Балаково, Россия)

Пичхидзе С.Я. - 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77,
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
e-mail: rectorat@sstu.ru

Аннотация: В статье показано, что при использовании термооксидирования, значительно увеличивается прочность связи резины с металлом и усилие отрыва. Разработана технологическая схема подготовки металлических каркасов методом термооксидирования.

Ключевые слова. Обработка, термооксидирование, адгезия, технология.

Известно, что для получения качественных резинотехнических изделий с металлическим каркасом (арматурой) необходима удовлетворительная адгезия резины к металлу. Обычная подготовка металла перед стадиями нанесения адгезивного слоя и вулканизации резиновых смесей предполагает фосфатирование.

Этот метод включает 9 стадий:

1. Обезжиривание. Состав ванны: тринатрийфосфат, сода кальцинированная, натрий кремнекислый, окись алкилдиметиламина, конденсат.
2. Промывка в горячей воде.
3. Промывка в холодной воде.
4. Промывка. Состав ванны: нитрит натрия, конденсат.
5. Фосфатирование. Состав ванны: кислота азотная, кислота ортофосфорная, белила цинковые, конденсат
6. Пассивирование. Состав ванны: хромовый ангидрид, фосфорная кислота, конденсат.
7. Промывка в холодной воде.
8. Ингибирование. Состав ванны: параформальдегид, моноэтаноламин.
9. Сушка.

Основными недостатками известных способов подготовки металлических изделий перед нанесением адгезивных (клеевых) слоёв и изготовлением резинотехнических изделий являются большие энергозатраты на нагрев, использование дополнительных устройств для генерации перегретого пара, низкая адгезионная прочность [1].

Технический результат заключается в увеличении прочности сцепления изделий из черных металлов с резиной при вулканизации [2].

Указанный технический результат достигается тем, что в разработанном способе подготовки металлических изделий при производстве резинометаллических изделий перед нанесением адгезивного слоя, включающем обработку металлической поверхности, согласно предлагаемому решению, обработку металлической поверхности осуществляют путем окисления в среде воздуха при температуре 220…240°С в течение 20…30 мин. Технологическая схема подготовки металлических изделий приведена на рис.1.

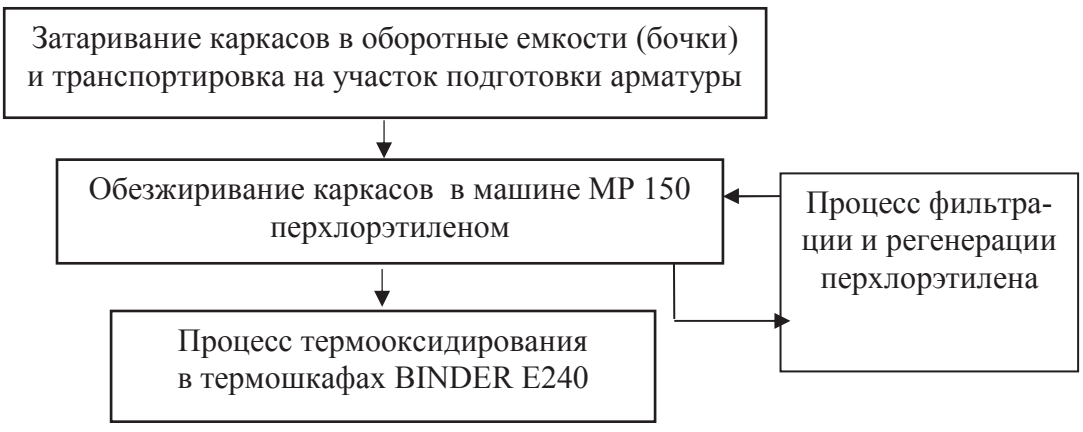


Рисунок 1 - Технологическая схема подготовки металлических каркасов.

Каркасы загружают в оборотные емкости (бочки) и транспортируют на участок подготовки арматуры.

Бочки с каркасами, с помощью крана, загружают в машину МР 150, где происходит их обезжиривание в перхлорэтилене при температуре 63…73ºС, цикл составляет 30…40 минут.

Технологический процесс в установке происходит в следующей последовательности:

1. Промывка с одновременным сливом растворителя из рабочей камеры.
2. Ополаскивание чистым растворителем.
3. Обработка паром.
4. Сушка с конденсацией паров растворителя.
5. Вентиляция рабочей камеры в ручном режиме.

Процесс фильтрации и регенерации растворителя.

Для поддержания максимальной чистоты растворителя воздействующего на поверхности изделий и гарантии постоянства результата используется:

Процесс фильтрации – отделение механических загрязнений из растворителя, размер частиц более 40 мкм. Процесс работает в течение всего времени работы насоса.

Процесс регенерации (дистилляции) растворителя – отделение растворимых загрязнений из растворителя. Часть растворителя, параллельно процессу фильтрации, постоянно подается в регенератор (дистиллятор), где происходит дистилляция перхлорэтилена, а растворенная в нем органика остается в кубовом остатке. Дистиллированный и сконденсированный растворитель стекает в накопительный бак. Таким образом, уровень растворенной в перхлорэтилене органики не превышает 3%, что уже даже без ополаскивания позволяет, например, иметь высокий уровень адгезии при нанесении лакокрасочных покрытий. Процесс дистилляции должен работать постоянно при включении оборудования.

Кубовый остаток из дистиллятора и использованные фильтрующие элементы составляют по массе 0,01-1% от массы промытых изделий.

Замена рабочей жидкости – перхлорэтилена не требуется.

Обезжиренные каркасы извлекают из машины и пересыпают в прямоугольные металлические ящики, затем проводят процесс термооксидирования, а именно: травление и высокотемпературное оксидирование. Термооксидирование проходит в термошкафах Е240 фирмы «BINDER», при температуре 220…240ºС с циклом 25…30 мин, где заготовки покрываются оксидным слоем (чем темнее цвет заготовки, тем лучше прошло термооксидирование).

Для оценки усилия отрыва металлических образцов был проведен модельный эксперимент, в котором образцы из стали в виде пятаков диаметром 25 мм с плоской поверхностью с одной стороны и выступающей частью с отверстием с другой стороны для присоединения к испытательному стенду, окисляли в среде воздуха при температуре 220…240ºС в течение 25…30 мин. Далее производилось нанесение грунта и адгезива.

К подготовленным таким образом образцам в специальной пресс-форме производилось крепление резины способом вулканизации при температуре 175°С в течение 7 минут и давлении в гидросистеме пресса вулканизационного 100 кг/см². Специальная пресс-форма устроена таким образом, что два образца устанавливались плоскими поверхностями друг к другу на расстоянии 2 мм. В процессе вулканизации расстояние между образцами заполнялось под давлением резиновой смесью К70-3060 на основе изопренового каучука СКИ-3.

Оценка адгезионной прочности соединений контрольных образцов из резины К70-3060 и металла выполнена на универсальной испытательной машине ИР 5082-100. При этом определялось усилие, необходимое для разделения слоев резины и металла, скорость перемещения подвижного захвата 100 мм/мин. Результаты исследования приведены на рис.2 и в табл.1.

Анализ приведенных результатов свидетельствует, что адгезионная прочность сцепления резины с металлом при разрыве повышается с 43,79 кгс/см² (без термооксидирования) до 80,44 кгс/см² (с термооксидированием). Таким образом, окисная пленка, получаемая на изделиях из черных металлов по предлагаемому способу, обладает высокой прочностью сцепления к основному металлу и адгезивному покрытию.

Время термооксидирования в течение 20…30 мин является оптимальным для подготовки изделий перед нанесением покрытия, что подтверждено результатами испытаний, представленными в табл.1. При меньшем или большем времени обработки качество подготовки металлической поверхности к нанесению специального адгезивного (клеевого) слоя снижается, что видно по снижению прочности связи резины с металлом за заявляемыми границами, и наличию максимального усилия отрыва в середине заявляемого диапазона времени обработки. Приведенные в табл.1 результаты получены при обработке изделий при температуре 240°С, однако близкие результаты были получены для диапазона температур 220…240°С.

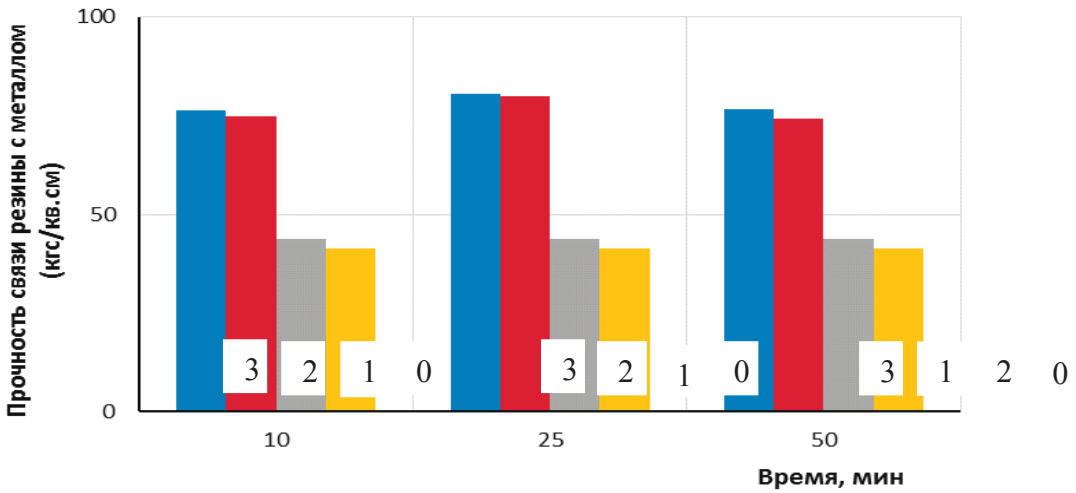


Рисунок 2 - Прочность связи резины с металлом: 0 – без термооксидирования грунт и адгезив “Cilbond”, 1 – без термооксидирования грунт и адгезив “Chemosil”, 2 – термооксидирование, грунт и адгезив “Cilbond”, 3 – термооксидирование, грунт и адгезив “Chemosil”

Таблица 1. Результаты испытаний образцов на адгезионную прочность

№ п/п	Наименование показателя	Время термооксидирования образца, мин			
		Без термо-оксидиро-вания	10	25	50
1	Усилие отрыва образцов с нанесением “Chemosil” (кгс)	215	375	395	376
2	Усилие отрыва образцов с нанесением Cilbond (кгс)	203	368	393	365
3	Площадь поверхности, см^2	4,91	4,91	4,91	4,91
4	Усилие отрыва, кгс	215	375	395	376
5	Характер разрушения	Частичное ого-ление металла	По резине	По резине	По резине

Выводы: 1) предложена технологическая схема подготовки металлических каркасов методом термооксидирования;

2) показано значительное увеличение прочности связи резины с металлом и усилия отрыва при использовании термооксидирования.

Список литературы

1. Металловедение и термическая обработка стали: Справ. изд. - 3-е изд., перераб. и доп. В 3-х т. Т. 1. Методы испытаний и исследования / Под ред. Бернштейна М.Л., Рахштадта А.Г. М.: Металлургия, 1983. - 352 с.

2. Заявка на изобретение №2013134683/02 (051900), С23С 8/18 Способ подготовки изделий перед нанесением адгезивного слоя / Копыльцов В.В., Игнатов А.И.

TERMOOKSIDIROVANIE METAL BLANKS

Pichhidze S.Y., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: serg5761@yandex.ru
Taganova V.A, C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: vav779@ya.ru

Abstract: The article shows a significant increase in bond strength rubber to metal and breakout force when using thermal oxidation. The technological scheme of preparation of metal frameworks is developed by thermal oxidation.

Keywords: Processing, thermal oxidation, adhesion, technology.

УДК 621.91.01

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ППД НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

М.А. ТАМАРКИН,
Э.Э. ТИЩЕНКО,
Д.В. КАЗАКОВ,
А.Г. ГРЕБЕНКИН
(ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Донской государственный технический университет (ДГТУ)
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
e-mail: tehn_rostov@mail.ru

Аннотация: В статье представлены результаты исследований отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки в среде стальных шариков. Установлены зависимости для определения глубины и степени упрочнения. Произведены исследования надежности технологических процессов. Разработана методика аналитического прогнозирования общей надежности технологических процессов отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки.

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая обработка, глубина упрочнения, степень упрочнения, надежность технологического процесса

Одной из важнейших задач современного машиностроения является повышение эффективности изделий, их долговечности и конкурентоспособности на мировом рынке. Использование методов упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД) позволяет эффективно решать поставленную задачу. Отделочно-упрочняющая центробежно-ротационная обработка (ОУ ЦРО) в среде стальных шариков является одним из наиболее эффективных методов обработки поверхностным пластическим деформированием и относится к динамическим методам ППД. Центробежно-ротационная обработка занимает особое место среди известных методов обработки деталей ППД гибкой гранулированной средой, т.к. обеспечивает наибольшую производительность процесса обработки, многократно превышающую производительность многих других методов.

Особую ценность при проектировании технологических процессов (ТП) имеет решение задач обеспечения их надежности. Надежность технологического процесса – это свойство ТП обеспечивать требуемые точность и качество детали, получаемые обработкой заготовки на одном или на нескольких этапах при условии сохранения на них промежуточных технологических параметров точности и качества в установленных пределах. Анализ применяемых в машиностроении технологических процессов показывает, что они подчиняются закономерностям, раскрытие которых на этапе проектирования необходимо для прогнозирования и эффективного управления этими процессами.

Проведены теоретические исследования надежности технологического процесса центробежно-ротационной обработки в среде стальных шариков. В ходе исследований определены параметры, характеризующие входные и выходные переменные процесса и параметры, характеризующие условия реализации технологического процесса при кибернетическом подходе.

Установлены наиболее значимые доминирующие факторы, оказывающие влияние на выходные параметры объекта управления:

- факторы, связанные с заготовкой, поступающей на обработку (жесткость, предел текучести, соответствие материала заготовки материалу, указанному в техническом задании, коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности);
- режимы обработки (объем загрузки рабочей камеры, частота вращения ротора, объем подаваемой технологической жидкости);
- характеристики рабочей среды (диаметры шариков);
- человеческий фактор.

При анализе работ исследователей динамических методов ППД [1-9] установлено, что результаты, полученные исследователями, недостаточно полно описывают процесс ОУ ЦРО в среде стальных шариков и не дают оценку надежности технологического процесса при обработке ППД. Нет примеров расчета надежности ТП и влияния формирующихся отказов. Представляется возможным использовать име-

ющиеся теоретические зависимости для расчёта глубины и степени упрочнения, произведя их уточнение с учётом условия пластичности Генки-Мизеса $(\sigma_i = \sigma_T)$, при описании пластически деформированной области, распространяющейся на некоторую глубину вокруг остаточной вмятины (пластического отпечатка).

Установлена зависимость для определения глубины упрочнения:

$$h_н = 9,7\sqrt[4]{\frac{ab\rho_ш}{k_s \cdot c \cdot \sigma_s}}\left[1-\frac{1}{2}\left(1-\frac{b}{a}\right)^4\right]\cdot\sqrt{V_{эф}\cdot R\cdot\sin\alpha}, \quad (1)$$

где R- радиус шарика, $\rho_ш$ - плотность материала шарика; σ_s - предел текучести материала детали; c – коэффициент несущей способности контактной поверхности; k_s - коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта; $V_{эф}$ - эффективная скорость движения шарика, a, b – полуоси эллипса контакта, α - угол встречи шарика с поверхностью детали.

Зависимость для определения степени упрочнения выглядит следующим образом:

$$\varepsilon = 2,03\sqrt{\frac{R^2\cdot\gamma^2\cdot\rho_ш}{HB}} \quad (2)$$

где HB – твердость материала детали по Бринеллю; γ - частота вращения ротора.

Определены показатели количественной оценки надёжности ТП: коэффициент запаса точности K_z, коэффициент мгновенного рассеивания $K_р$, коэффициент смещения $K_{см}$ контролируемого параметра.

Разработана методика аналитического прогнозирования общей надежности технологических процессов ОУ ЦРО. Для подтверждения разработанной системы моделей проведены экспериментальные исследования рассматриваемого процесса.

Для образцов использовались материалы с различным пределом текучести, применяемые в общем машиностроении и авиастроении (сталь 45, алюминиевый сплав Д16Т и др.). Эксперименты проводили на станке для центробежно-ротационной обработки - ЦРС-7. Обработка в среде стальных шариков производилась «внавал».

При проведении исследований выявлены зависимости изменения степени упрочнения и глубины упрочненного слоя поверхности от твердости, предела текучести материала детали, частоты вращения ротора, диаметра шарика, некоторые из которых представлены на рис. 1 и 2 . Теоретические зависимости изображены линией, а точками обозначены экспериментальные данные с доверительными интервалами.

Были проведены расчеты параметров надежности ТП при возможном разбросе частоты вращения ротора γ и возможном разбросе диаметров стальных шариков при обработке деталей из различных материалов. Некоторые результаты представлены на рисунках 3-5.

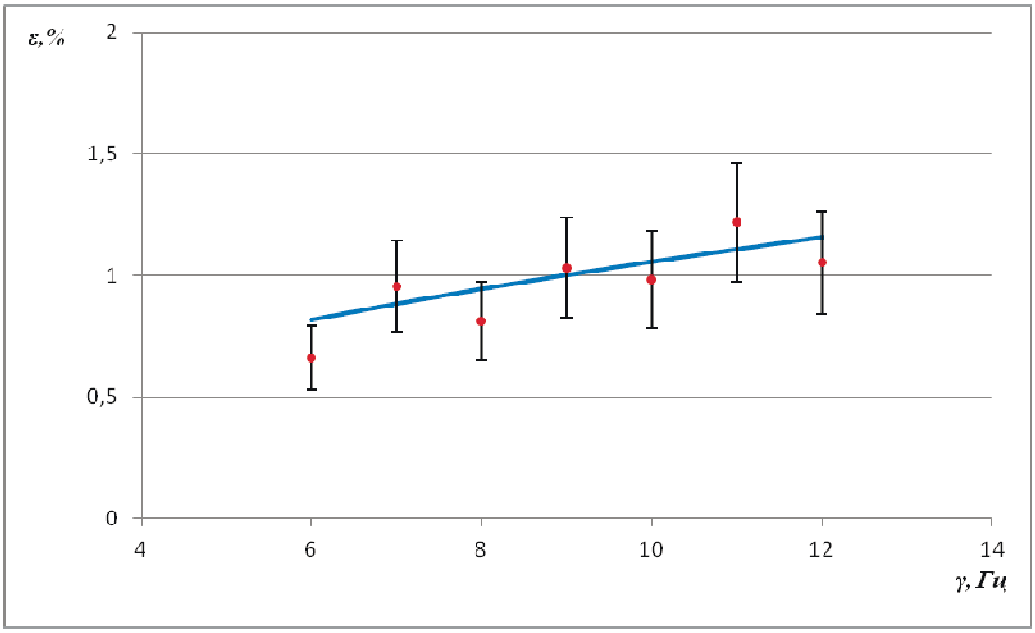


Рисунок 1 - Зависимость изменения степени упрочнения поверхности детали от частоты вращения ротора

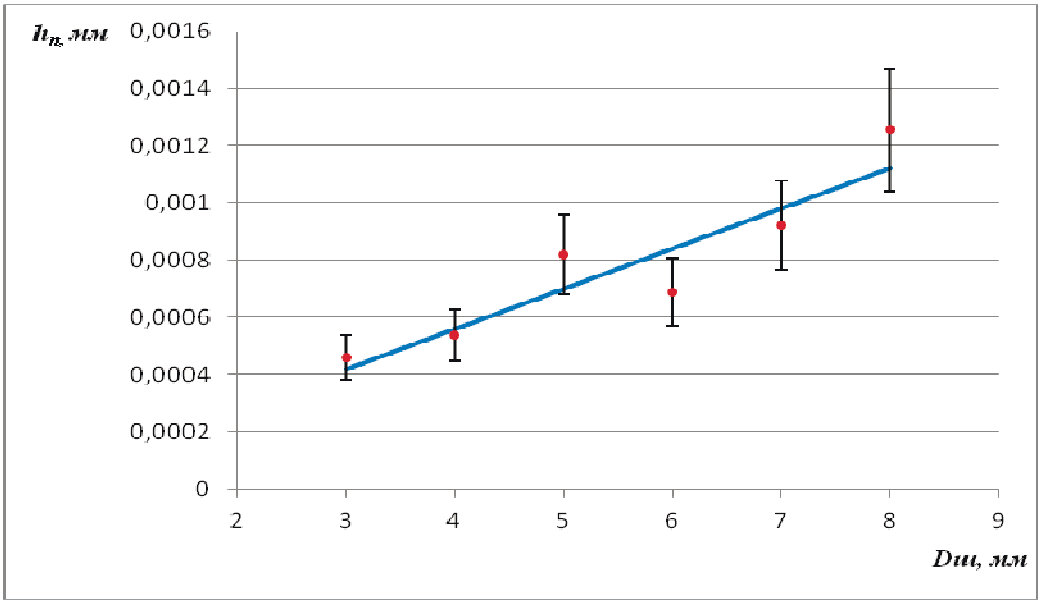


Рисунок 2 - Зависимость изменения глубины упрочненного слоя поверхности детали от величины диаметра шарика

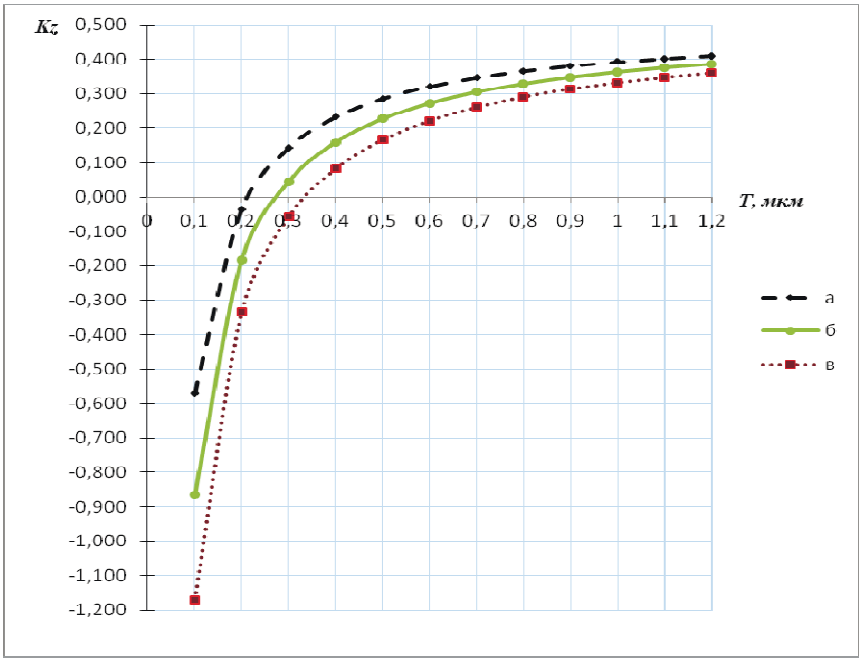


Рисунок 3 - Влияние величины допуска Т и изменения диапазона регулирования частоты вращения ротора γ на надежность ТП ОУ ЦРО в среде стальных шариков диаметром 4мм. Материал – сталь 45. Контролируемый параметр – шероховатость поверхности Ra: а) γ=6Гц, б) γ=9Гц, в) γ=12Гц. Разброс γ=5%.

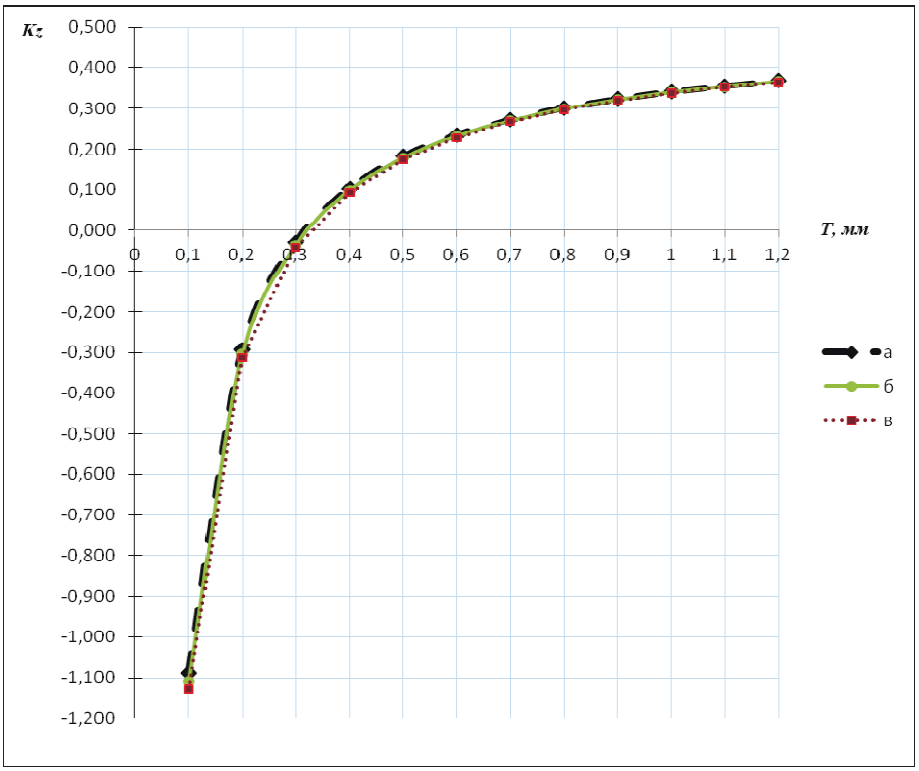


Рисунок 4 - Влияние величины допуска T 0,1 – 1,2 мм и изменения диапазона регулирования частоты вращения ротора γ на надежность ТП ЦРО в среде стальных шариков диаметром 4мм. Материал - сталь 45. Контролируемый параметр – глубина упрочнения h_n: а) γ=6Гц, б) γ=9Гц, в) γ=12Гц. Разброс γ=5%.

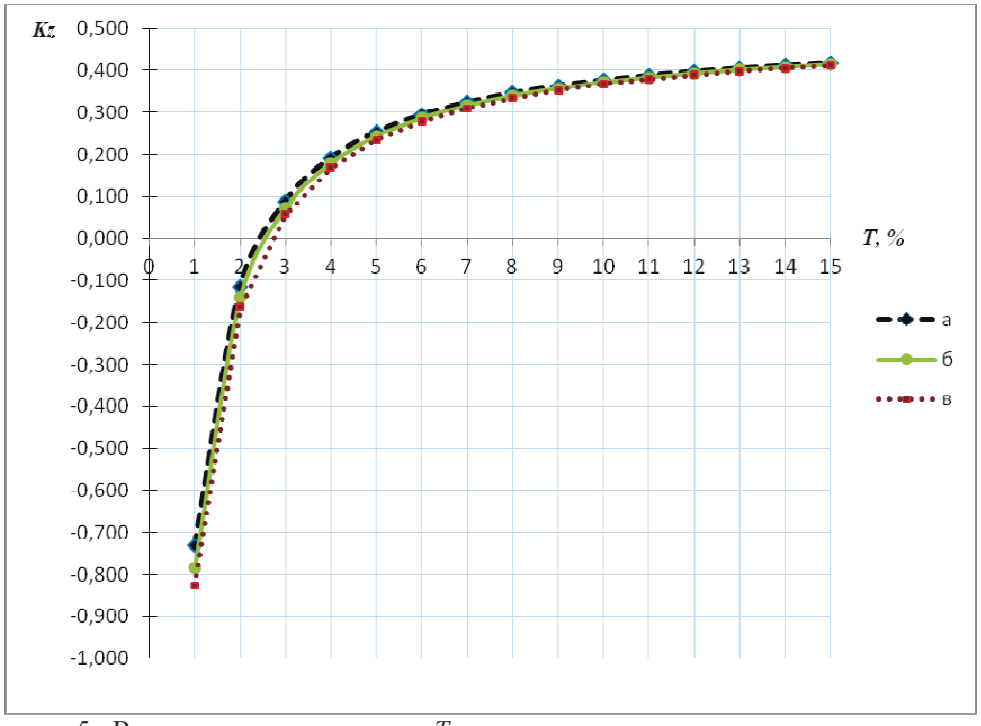


Рисунок 5 - Влияние величины допуска T и изменения диапазона регулирования частоты вращения ротора γ на надежность ТП ЦРО в среде стальных шариков диаметром 4, 6 и 8 мм. Материал – сталь 45. Контролируемый параметр – степень упрочнения ε: а) γ=6Гц, б) γ=9Гц, в) γ=12Гц. Разброс γ=5%.

Произведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований глубины упрочненного слоя и степени упрочнения. Разница между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 20%, что говорит о том, что представленные теоретические зависимости адекватны.

По результатам исследований рекомендован оптимальный объем подаваемой технологической жидкости для различных условий обработки. Установлено, что степень упрочнения не зависит от размера шариков.

На основании приведенных зависимостей на кафедре «Технология машиностроения» разработана методика проектирования технологических процессов центробежно-ротационной обработки в среде стальных шариков.

Поиск наилучшего из всего множества проектных решений производится на базе оптимизационной модели процесса. Критерием рациональности являются минимальное время обработки, и обеспечение значения коэффициента запаса точности выше нуля.

Список литературы

1. *Тамаркин М.А. Тищенко Э.Э.* Разработка обобщенной теории формирования поверхностного слоя при отделочно-упрочняющей обработке деталей ППД в гибких гранулированных средах./ Инженерия поверхностного слоя, Междунар. науч.-техн. конф. Познань, Польша, 2014

2. *Трилисский В.О.* и др. Объемная центробежно-ротационная обработка деталей / НИИмаш, М., 1983. - 53с.

3. *Дубровский П.В.* Обеспечение надежности технологических процессов: Учебное пособие. / П.В. Дубровский – Ульяновск: УлГТУ, 2000 г. – 124 с.

4. *Корольков Ю.В.* Повышение надежности технологического процесса центробежно-ротационной обработки в среде абразива: Дис. канд. техн. наук / Ю.В. Корольков – Ростов-на-Дону, 2011– 186 с.

RELIABLE DYNAMIC METHODS PPD FOR EXAMPLE CENTRIFUGAL ROTARY PROCESSING

MA Tamarkin,
EE Tishchenko,
DV Kazakov,
AG Grebenkine

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Don State Technical University (DSTU), 344000, Rostov-on-Don, pl. Gagarina, 1, e-mail: tehn_rostov@mail.ru

Abstract: The article presents the results of research of finishing-strengthening centrifugal rotary machining of medium steel balls. The dependencies to determine the depth and extent of hardening. Manufactured research process reliability. A method for predicting the overall reliability of the analytical processes of finishing-strengthening centrifugal rotary processing.

Keywords: finishing and hardening process, hardening depth, the degree of hardening process reliability

УДК 621.91.01

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ГРУППОВОЙ ОБРАБОТКИ БАЗОВЫХ ОТВЕРСТИЙ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Е. Ю. ТАТАРКИН[1], доктор техн. наук, профессор
А. М. ФИРСОВ[2], канд. техн. наук, доцент
В. А. КАЛИСТРУ[2], аспирант
([1]АлтГТУ, г. Барнаул, [2] БТИ АлтГТУ г. Бийск)

Фирсов А.М.– 659305 г. Бийск, ул. Трофимова 27, Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, тел.8(3854) 43-53-02, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

Аннотация: Анализ этапов технологической подготовки группового технологического процесса (ГТП) показал, что существующая методика проектирования не учитывает ряд факторов, конструктивного или другого характера, которые приводят к появлению отклонений (отказов) выходных параметров технологического процесса больше допустимого. Предложен алгоритм проектирования ГТП с использованием методов «Анализ видов и последствий отказов» и поискового проектирования. Это позволяет на этапе проектирования ГТП выявить потенциальные отказы, разработать мероприятия, позволяющие предотвратить отказы и обеспечить требуемые выходные параметры.

Ключевые слова: Групповая обработка, технологическая подготовка, корпусные детали, базовые отверстия, потенциальные отказы, алгоритм проектирования.

Введение. Современное машиностроительное производство характеризуется широкой номенклатурой выпускаемой продукции и применением многофункционального технологического оборудования с ЧПУ, которое позволяет обрабатывать разные по конструкции детали. Эффективность этого оборудования определяется степенью его загруженности. Однако обеспечение максимальной загрузки этого оборудования не всегда удается, так как широкая номенклатура обрабатываемых изделий требует непрерывного проектирования ТП и переналадки оборудования для обработки одной или группы деталей. Увеличение загрузки оборудования возможно за счет применения групповой обработки деталей, принципы которой были разработаны С.П. Митрофановым, А.П. Соколовским [1, 2] и нашли развитие в работах Б.М. Базрова [3] и др. Однако при объединении деталей с разной геометрической формой возникают сложности проектирования ТП, поэтому групповая обработка не находит широкого применения при изготовлении деталей с разными конструктивными признаками, как, например, корпусные детали.

Большое многообразие конструктивных форм корпусных деталей, (входят в 72 и 73 классы деталей, классификатора ЕСКД), их материалов и методов получения заготовок, не позволяет группировать их по конструктивным и технологическим признакам и создавать комплексную деталь, для которой возможно применение типовых технологических решений, характерных для крупносерийного и массового производства. Объединение корпусных деталей в группы возможно по конструктивным и технологическим признакам базовых отверстий, которые имеют самые разнообразные конструктивные формы и выполняют в корпусных деталях функции опорных или направляющих поверхностей, имеют повышенные технические требования по точности размеров, отклонениям формы, шероховатости поверхности, износостойкости и др. Трудоемкость их обработки может составлять более 60% от общей трудоемкости.

Отличительные конструктивные признаки базового отверстия, не всегда позволяют применять технологические решения для обработки базовых отверстий всех деталей, объединенных в группу. Это связано с тем, что имеются конструктивные или другие отличительные признаки, которые не учтены в нормативно-технической документации (НТД) и поэтому обработка таких деталей, даже по единичному ТП, может привести к отказам. Поэтому принятые типовые технологические решения, характерные для единичных ТП, не обеспечивают требуемые выходные параметры групповой технологической операции при изготовлении всех деталей группы и при обработке каких-то деталей группы возникают отказы, например, в виде невыполнения требований по геометрической точности обрабатываемой поверхности, производительности, затратам и т.п. Устранение отказов методом пробных ходов и промеров во время отладки или при выполнении технологического процесса значительно повышают трудоемкость. Следовательно, необходимо прогнозировать появление потенциально возможных от-

казов на стадии проектирования ТП для всех деталей, объединенных в группу, и принимать меры по их предотвращению.

Прогнозирование выходных параметров ТП, а также их отклонений от требуемой величины (отказов) возможно выполнить с использованием аналитических (расчетных), статистических и экспертных методов оценки. Однако, в условиях многономенклатурного производства при проектировании групповой обработки, применение этих методов не всегда представляется возможным, так как в группу, для повышения эффективности ГТП, могут быть объединены разные по конструкции детали. Поэтому расчетный метод может быть трудоемким и не всегда будут адекватным для всех конструкций деталей, результаты статистических исследований отсутствуют, экспертная оценка, как правило, позволяет провести только качественную оценку выходных параметров. Поэтому необходимо применять метод оценки, который предполагает применение элементов всех методов и поэтому позволяет: выявить потенциальные отказы, которые могут возникнуть при выполнении процесса; определить основные причины их появления и возможные последствия; выработать действия по устранению этих причин или предотвращению возможных последствий. К одному из таких методов относится метод «Анализ видов и последствий отказов» (АВПО), который успешно применяется для оценки надежности различных объектов и технологий [4]. Однако применение этого метода для проектирования ГТП неизвестно, поэтому применение его для выявления потенциальных отказов и их последствий на стадии проектирования ГТП является важной научно-технической задачей.

Теория. Согласно требованиям ЕСТПП проектирование группового технологического процесса включает ряд этапов, которые можно объединить в три основных: 1–анализ исходных данных, группирование деталей и создание комплексной детали; 2–проектирование ТП для комплексной детали и оценка его результатов; 3–обеспечение условий выполнения ТП и оформление документации. Однако при проектировании ГТП обработки деталей с отличительными конструктивными признаками необходимо ввести дополнительные этапы.

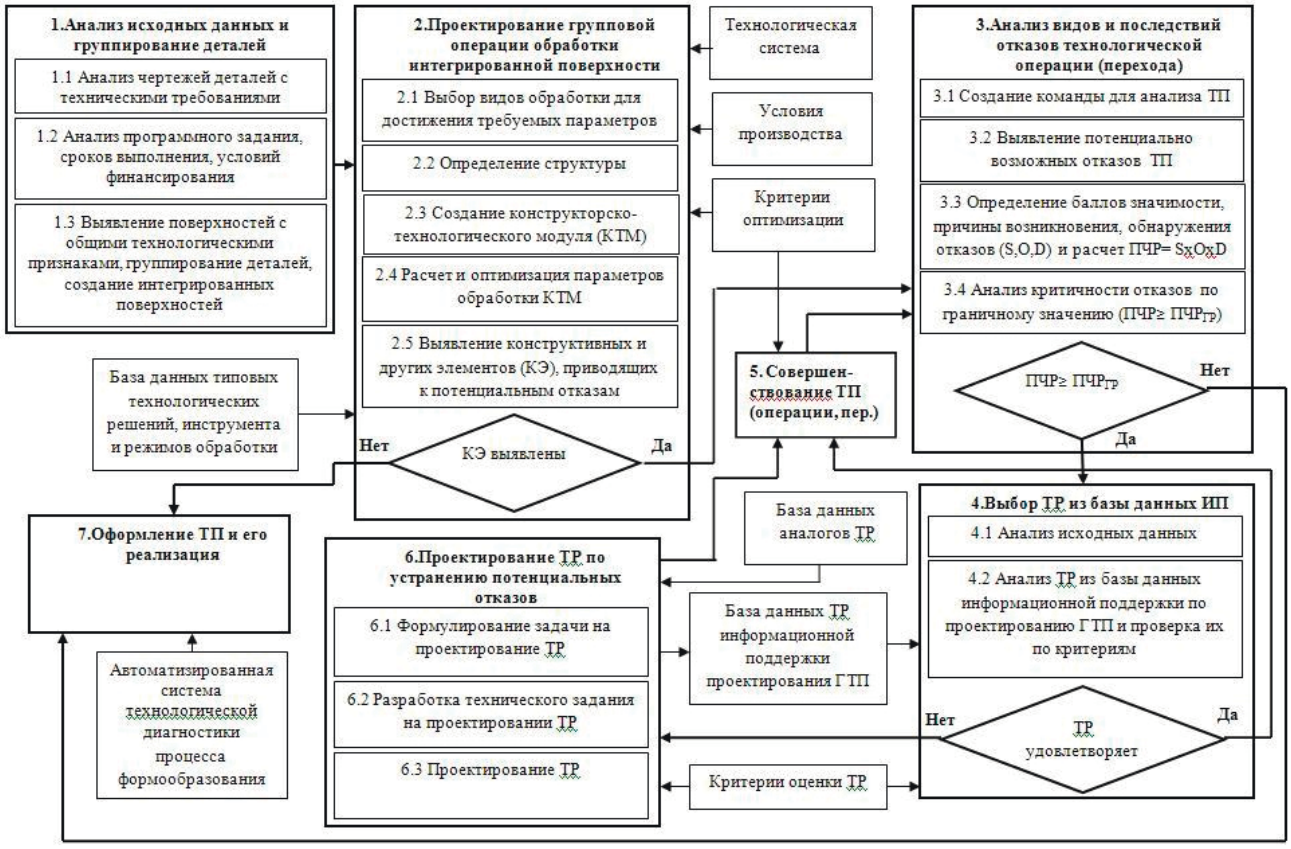


Рисунок 1– Схема алгоритма проектирования групповой технологической операции с применением методов АВПО и поискового проектирования

Эти этапы связанны с анализом влияния особенных конструктивных элементов деталей, объединенных в группу, оценкой их влияния на выходные параметры ТП, принятие решений о изменении условий реализации ТП, а также проектирование технологических или технических решений, которые позволят учитывать особенности конструкции деталей входящих в группу и тем самым обеспечить требуемые выходные параметры для всех деталей. Реализация этих этапов производится с помощью методов «Анализ видов и последствий отказов» и поискового проектирования.

Алгоритм проектирования ГТП с применением этих методов представлен в виде схемы, показанной на рисунке 1 и который включает в себя ряд этапов. На первом этапе анализируются исходные данные для проектирования: чертежи деталей с техническими требованиями по точности размеров, отклонениям формы поверхности, шероховатости и др.; программное задание и сроки выполнения задания, что определяет производительность; коммерческое предложение по финансированию договора на изготовление партии изделий, что определяет технологическую себестоимость. После проведения анализа исходных данных и принятия решения о заключении договора на изготовление деталей, производится группирование деталей, которое может выполняться по разным признакам. При объединении в группу разных по конструкции деталей необходимо в конструкции детали выявить близкие по конструктивным и технологическим признакам поверхности и создать интегрированную поверхность, объединяющую все признаки поверхностей деталей, объединяемых в группу.

После группирования деталей проектируется групповая операция (2этап проектирования) и разрабатывается деталеоперация, т.е. план переходов при обработке конкретной детали (поверхности) из номенклатуры деталей группы**.** В случае, если в группу объединяются разные по конструкции детали, то групповая операция разрабатывается для интегрированных поверхностей, для которых определяется последовательность технологических действий, необходимых для обеспечения заданных технологических требований, то есть создается конструкторско-технологический модуль (КТМ), состоящий из интегрированной поверхности и технологических действий для группы деталей.

План переходов обработки детали (поверхности), инструмент и режимы обработки выбираются из базы данных (БД) известных типовых решений для условий, которые регламентируются НТД, с учетом условий производства, состояния технологической системы и других ограничений. Так как в группу объединены детали с конструктивными признаками, которые не учтены НТД, то необходимо провести анализ воздействия этих отличительных признаков на ход выполнения технологического процесса (операции). В случае, если имеются конструктивные элементы (КЭ) или другие факторы, которые могут привести к потенциальным отказам, то необходимо провести анализ их воздействия на выходные параметры ТП.

Этот этап проектирования (3этап) выполняется согласно требованиям метода АВПО и включает в себя ряд действий: создается группа экспертов из разных специалистов, которые выявляют потенциально возможные отказы технологического процесса (операции, перехода) и анализируют их последствия; для каждого последствия отказа определятся балл значимости «S» по 10 бальной шкале (чем значимей последствие, тем выше балл); для каждого отказа определяются причины отказа, их может быть несколько и для каждой причины устанавливается балл возникновения «O» по 10 бальной шкале (чем чаще причина приводит к отказу, тем выше балл); для каждого отказа и каждой отдельной причины определяется балл обнаружения отказа в процессе изготовления «D», который также оценивается по 10 бальной шкале (чем сложнее обнаружить отказ (причину), тем выше балл); после оценки значимости, возникновения и обнаружения отказов для каждого отказа и причины рассчитывается приоритетное число риска ПЧР=S·O·D (каждое ПЧР может иметь значения от 1 до 1000, его критическая граница ($ПЧР_{ГР}$) рекомендована в пределах от 100 до 125); проводится анализ каждого отказа по ПЧР. Если $ПЧР<ПЧР_{ГР}$, то отказ считается не значимым и проектирование операции на этом заканчивается и выполняется оформление групповой технологической операции, если $ПЧР\geq ПЧР_{ГР}$, то отказы считаются значимыми и для них следует разрабатывать технологические, технические решения (ТР), которые позволят предотвратить появление отказов или уменьшить его влияние до допустимых значений.

Прежде чем разрабатывать новое ТР, следует провести анализ (4 этап) наличия ТР в БД информационной поддержки (ИП) проектирования групповых технологических процессов (операций). В этой базе имеются сведения о конструктивных элементах (КЭ) деталей, которые могут быть причиной возникновения отказов, виды отказов и ТР, которые предотвращают появление отказа полностью или уменьшают его действие до допустимых требований. Эта информационная поддержка формируется из данных, полученных при проектировании ТП обработки деталей со схожими конструктивными и технологическими признаками. В случае если существует ТР, которое ранее было разработано, то необходимо провести оценку ТР по критериям,

которые включают набор требований, предъявляемых к ТР по функциональности, технологичности, экономичности и безопасности. Если существующее в БД ИП ТР удовлетворят, предъявленным требованиям, то оно применяется для совершенствования технологического процесса (операции, перехода) (5этап). Совершенствование может заключаться в изменении вида обработки, структуры, средств оснащения, режимов обработки и т.п. Если ТР не удовлетворяет, предъявленным требованиям, то следует выполнить проектирование нового ТР. Также проектирование нового ТР производится, если в БД ИП отсутствуют данные по ТР, позволяющее устранить параметрический отказ.

При проектировании нового ТР (6 этап) следует сформулировать задачи и разработать техническое задание (ТЗ) на проектирование. Постановка задачи, согласно требованиям поискового проектирования, включает в себя этапы предварительного формулирования задачи и уточненной постановки задачи. На этапе предварительного формулирования производится: описание проблемной ситуации; описание назначения технического объекта; выбор прототипа и составление списка требований; составление списка недостатков прототипа; предварительная формулировка задачи. При уточненной постановке задачи выполняется: анализ функций прототипа и построение улучшенной конструктивной функциональной структуры; анализ функций вышестоящей по иерархии системы; выявление причин возникновения недостатков; выявления и анализ противоречий развития; уточнение списка прототипов и формулирование идеального технического решений; улучшение других показателей технического объекта; уточненная постановка задачи.

ТЗ на проектирование технологического, технического решения представляет собой количественное описание функций объекта проектирования и перечень технических требований или условий, которым должно удовлетворять ТР. На основании ТЗ производится разработка, проектирование ТР, которое выполняется с применением методов поискового проектирования, например, «мозгового штурма», «эвристических приемов», «морфологического анализа и синтеза» и др. Созданное ТР оценивается при помощи критериев. В случае удовлетворения ТР, предъявленным требованиям, оно применяется для совершенствования ТП (операции, перехода) (5этап) и заносится в БД ИП для дальнейшего применения.

После совершенствования ТП определяется ПЧР для принятых технологических или технических решений и, в случае обеспечения требуемых выходных параметров, ТП принимается к реализации, в противном случае цикл повторяется до тех пор, пока не будет выполнено условие ПЧР< $ПЧР_{ГР}$.

Результаты. Предложенная методология позволяет выявить и устранить потенциальные отказы, которые могут проявиться в результате воздействия, неучтенных в нормативно-технологической документации по проектированию технологических операций, конструктивных особенностей заготовки или других факторов, на стадии ТПП.

Выводы. В результате анализа этапов технологической подготовки ГТП установлено, что существующая методика проектирования не учитывает ряд факторов, конструктивного или другого характера, которые приводят к появлению отклонений (отказов) выходных параметров технологического процесса больше допустимого. Предложен алгоритм проектирования ГТП с использованием методов «Анализ видов и последствий отказов» и поискового проектирования. Это позволяет на этапе проектирования ГТП выявить потенциальные отказы, разработать мероприятия, позволяющие предотвратить появление отказов и обеспечить требуемые выходные параметры при реализации ГТП.

Список литературы

1. *Митрофанов С.П.* Групповая технология машиностроительного производства. [текст] В 2-х т. Т.1 Организация группового производства. – Л.: Машиностроение, 1983.–407 с.
2. *Соколовский А.П.* Курс технологии машиностроения. [текст] В 2-х частях. Ч.1 Общие вопросы технологии механической обработки. – М., Л.: Машгиз, 1947.–435 с.
3. *Базров Б.М.* Модульная технология в машиностроении. [текст]– М.: Машиностроение, 2001.– 368 с.
4. ГОСТ 27.310 – 95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. [текст]– М.: – Издательство стандартов, 1996. –20 с.

DESIGN FEATURES OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN TERMS OF MULTI-PRODUCT MANUFACTURING

Tatarkin E.Yu., D. Sc. (Engineering), Professor, e-mail: etatarkin@mail.ru
Firsov A.M., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mrsi@bti.secna.ru
Kalistru V.A., graduate student, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

1 - Altai State Technical University, Barnaul, Lenin Avenue, 46, phone 8(3852) 29-09-23, e-mail: agtu-otm2010@mail.ru
2 - Biysk technological Institute (branch) Altai state technical University n.a. I. I. Polzunov, Biysk, Trofimova street, 27, phone 8(3854) 43-53-02, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

Abstract: The article describes a cause of failure during group processing of details in multiproduct production. The article suggests an algorithm of designing of group technological process which includes several stages: analysis of structures of parts to be processed; identification of common signs and grouping of workpieces; designing of group operation; identification of potential failures; evaluation of severity of failures; deciding on a development of process or technical solutions, eliminating potential failure; creation of a database of potential failures that occur during processing of structural elements details. The proposed methodology allows to reduce a probability of failure for group processing of workpieces with different structural characteristics.

Keywords: multiproduct production; group processes; failures; forecasting; analysis of types of failure consequences; an algorithm of designing.

УДК 621.9

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ОПЕРАЦИЙ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Е.Ю. ТАТАРКИН, доктор техн. наук, профессор,
А.М. ИКОННИКОВ, канд. техн. наук, доцент,
Т.А. ШРАЙНЕР, магистрант
(*АлтГТУ, г. Барнаул, Россия*)

Татаркин Е.Ю. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова,
e-mail: iamagtu@mail.ru

Аннотация: В статье рассмотрены основные критерии автоматизированного подбора оптимальной инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки деталей групповых технологических процессов. Для сокращения трудовых и материальных затрат, связанных с выбором инструмента, предложен алгоритм системы автоматизированного подбора инструментальной оснастки и описаны программные модули. В результате применения программы пользователю будет представлен отчет в виде спецификации на выбранную инструментальную оснастку с рассчитанными режимами резания, траекторией движения инструмента, техническим нормированием, ФСА-анализом операции и списком возможных альтернатив инструментальной оснастки с оценками предпочтения выбора по ряду критериев.

Ключевые слова: Магнитно-абразивная обработка, групповой технологический процесс, инструментальная оснастка, технологическая подготовка производства (ТПП), системы автоматизированного проектирования (САПР), оборудование с ЧПУ.

1. Введение

Требования по совершенствованию и сокращению сроков ТПП вызвали необходимость увеличения применения автоматизированного оборудования, станков с ЧПУ, высокопроизводительного инструмента, информационного и программного обеспечения, систем автоматизированного проектирования (САПР) и выбора режущего инструмента.

Современное металлорежущее оборудование с ЧПУ обеспечивает требуемую экономическую эффективность изготовления деталей при одновременном выполнении двух технологических условий – максимальной производительности и заданной точности обработки. Выбор режущего инструмента и инструментальной оснастки является важнейшим элементом, влияющим на реализацию указанных условий.

Существующие базы данных и экспертные системы выбора инструмента разработаны для конкретных производственных условий, и не позволяют сравнить между собой однотипные конструкции различных производителей и изменить критерии выбора оптимальных вариантов конструкций оснастки [1].

Оптимальный выбор инструментальной оснастки является очень важной и сложной задачей, так как ее неправильный выбор может не только привести к неудовлетворительной обработке, но и к ее поломке, срыву сроков производства и т.д. На сегодняшний день проблема выбора инструмента получает все большую актуальность вследствие увеличения доли мелкосерийного производства в общем объеме машиностроения. В мелкосерийном и серийном производстве широко используется групповая технология, позволяющая повысить коэффициент закрепления операций и создать условия производства, близкие к крупносерийному и массовому.

Групповая обработка деталей основана на объединении деталей в группы, для каждой из которых применимы однородные технологические операции и общая быстро переналаживаемая технологическая оснастка. Данная технология позволяет повысить производительность обработки, сократить себестоимость технологической оснастки и срок технологической подготовки производства.

Повышению эффективности автоматизированной разработки ТП во многом способствует рациональное сочетание высокопроизводительных групповых технологических процессов с прогрессивными технологиями финишной обработки, к которым относится магнитно-абразивная обработка (МАО). Сущность МАО состоит в абразивном воздействии на

обрабатываемую деталь порошковой ферромагнитной абразивной массы, уплотненной энергией магнитного поля [2].

2. Теория

В качестве объекта исследования в настоящей работе выбран процесс подбора оптимальной инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей изделий группового технологического процесса на оборудовании с ЧПУ. Выбор осуществляется на основе данных, полученных из геометрических моделей группы деталей, представляемых в виде 2D-чертежей или 3D-моделей, с последующей передачей спецификации на выбранную оснастку в CAM-систему и САПР ТП.

Для решения указанных проблем авторами разрабатывается автоматизированная система, позволяющая на основе 3D-модели изделия и технологической информации (материал и твердость заготовки, размерные допуски, шероховатость поверхностей) автоматически формировать, ранжировать и выбирать различные варианты структурных компоновок инструментальной оснастки в зависимости от ряда критериев, рассчитывать оптимальные режимы резания. На рисунке 1 приведена блок-схема алгоритма выбора инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки деталей группового технологического процесса.

Разрабатываемый программный комплекс включает следующие модули:

1. Подсистема загрузки и интерпретации чертежей в 3D-модели;
2. Подсистема проектирования комплексной детали группы;
3. Подсистема декомпозиции комплексной детали на КТЭФ;
4. Подсистема подбора вариантов инструментальной оснастки на основе критериев и технических требований;
5. Подсистема поиска оптимальной инструментальной оснастки и альтернативных вариантов на основе критериев оптимизации;
6. Подсистема выбора оптимального вида магнитно-абразивного порошка и смазочно-охлаждающей жидкости согласно техническим требованиям;
7. Подсистема выбора и расчета траектории обработки;
8. Подсистема расчета режимов резания;
9. Подсистема технического нормирования операции;
10. Подсистема функционально-стоимостного анализа (ФСА) операции;
11. Подсистема интеграции с CAD/CAM-системами.

Можно выделить ряд основных критериев, влияющих на выбор магнитного индуктора (МИ), магнитно-абразивного порошка (МАП) смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ):

- тип операции;
- характер магнитного поля;
- форма рабочей поверхности МИ;
- конструктивно-геометрические параметры МИ;
- расположение магнитов и магнитопроводов;
- размер, вид и точность заготовки;
- состояние поверхностного слоя заготовки;
- свойства обрабатываемого материала;
- профиль обрабатываемой поверхности;
- величина рабочего зазора;
- кинематика процесса обработки;
- технологические особенности оборудования;
- требования по качеству поверхности обрабатываемой детали;
- траектория движения инструмента;
- условия обработки;
- структура зерен магнитно-абразивного порошка;
- физико-механические и геометрические характеристики МАП;
- возможность применения и химический состав СОЖ;
- другие параметры инструментальной оснастки для МАО.

Исходными данными для программного обеспечения являются 2D-чертежи или 3D-модели обрабатываемых деталей, представленные в формате IGES. Подсистема загрузки модели и чертежа детали предназначена для процедуры ввода данных о детали. Геометрической информации о детали недостаточно для определения инструмента, поэтому в модуле чтения IGES интерпретируются технические требования с рабочего чертежа: материал, твердость заготовки, размерные допуски, шероховатость поверхностей.

Подсистема проектирования комплексной детали группы на основе конструктивно-технологических признаков выбирает деталь, содержащую в своей конструкции все элементы (поверхности) деталей, входящих в группу. В случае, когда такая деталь отсутствует, система искусственно проектирует комплексную деталь, содержащую все основные элементы группы деталей.

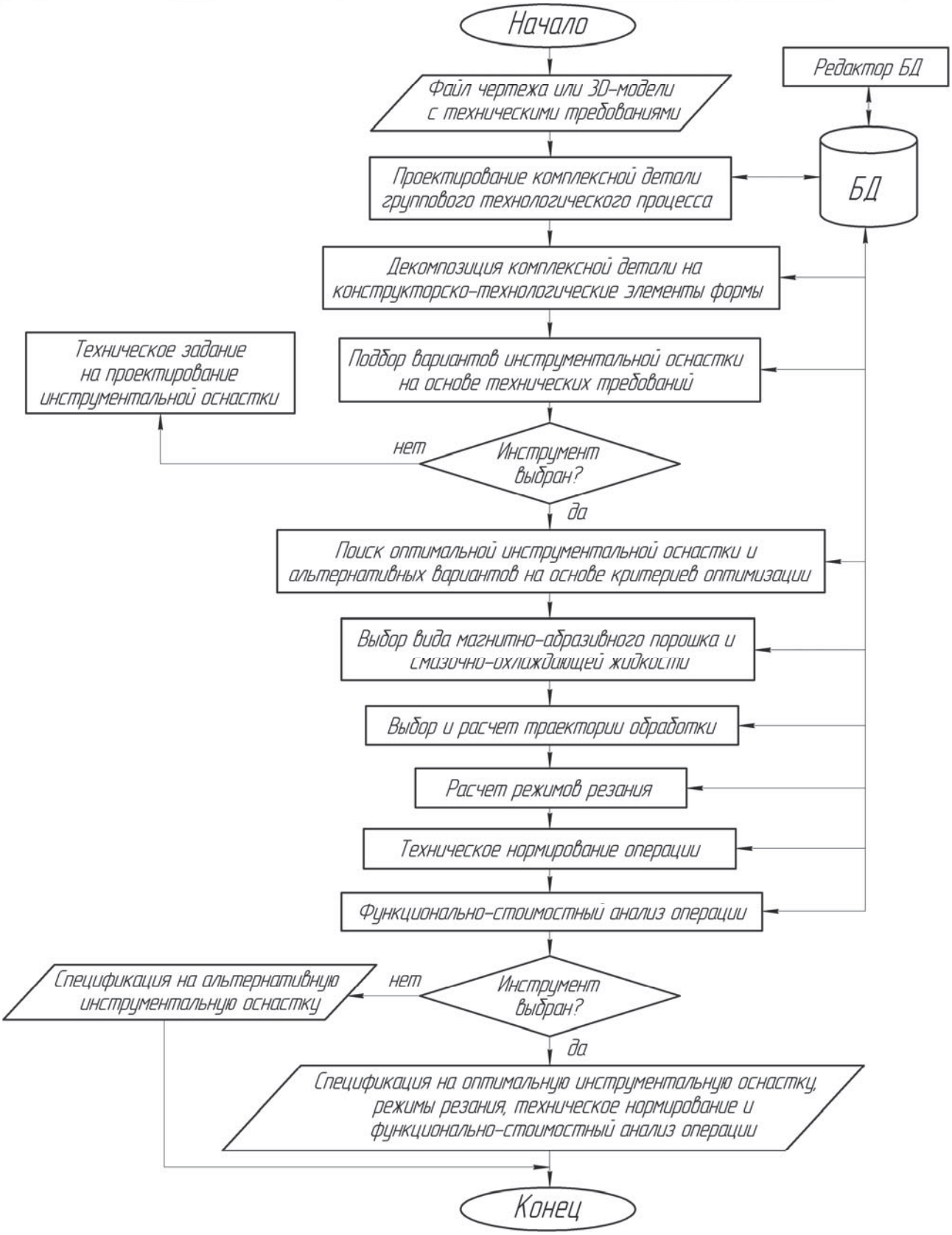


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма выбора инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки деталей группового технологического процесса

Подсистема структурной декомпозиции разбивает 3D-модель комплексной детали на КТЭФ (конструкторско-технологические элементы формы) и записывает это представление в единую базу данных системы. Примерами КТЭФ являются фаска, цилиндрическая поверхность, канавка и т.д. Информация о КТЭФ включает в себя совокупность параметров, однозначно определяющих форму, размеры, шероховатость поверхности, отклонения от ее правильной формы, физико-механические свойства.

В подсистеме подбора инструментальной оснастки организовано распознавание КТЭФ, автоматизированное определение типа операции, вида обработки, используемой заготовки и ее состояния. На основе данных о материале заготовки, твердости и качестве исходной поверхности, а также о квалитете заготовки и детали определяется число проходов магнитно-абразивной обработки.

В главном окне приложения будут выведены вкладки с различные представлениями детали (3D-модель комплексной детали, по деталям группы, по КТЭФ, видам обработки), отображаться технологическая информация.

С учетом технологической информации о детали в подсистеме подбора вариантов инструментальной оснастки выбираются конструктивно-геометрические параметры магнитных индукторов и кинематика процесса абразивной обработки, которые влияют на постоянство величины рабочего зазора и способность обеспечивать определенную шероховатость поверхности.

На следующем этапе методом решения задачи многокритериального выбора определяется оптимальный вариант магнитного индуктора. Многокритериальная задача поиска наилучшей инструментальной оснастки включает выбор критериев оптимизации, которые пользователь определяет и ранжирует по приоритету согласно целевой функции поиска. Критериями поиска оптимального решения могут быть стоимость, производитель, универсальность конструкции, возможность быстрой переналадки и др.

В подсистеме выбора оптимального магнитно-абразивного порошка и смазочно-охлаждающей жидкости в зависимости от вида обработки определяются физико-механические и геометрические характеристик МАП (форма, состав, структура, зернистость, стойкость, режущая способность, магнитная проницаемость зерен порошка) и рекомендуемый химический состав СОЖ в зависимости от материала и состоянии заготовки, условий обработки, типа операции и технологических возможностей оборудования.

Одним из основных критериев выбора на каждом этапе является экономичность обработки, которая определяется стоимостью инструмента, его стойкостью, взаимозаменяемостью, стоимостью машинного времени и другими экономическими критериями, которые рассматриваются в разрезе подсистемы ФСА-анализа. Разрабатываемая автоматизированная система предоставляет расширяемую библиотеку современного оборудования. В итоге пользователю представляется отчет в виде спецификации на выбранную инструментальную оснастку с рассчитанными режимами резания, траекторией движения инструмента, техническим нормированием и ФСА-анализом операций. Также отчет содержит список возможных альтернатив инструментальной оснастки с оценками предпочтения выбора по разным критериям.

Автоматизированная система выбора включает в себя базу данных конструкторско-технологических элементов, инструментальной оснастки, магнитно-абразивных порошков и смазочно-охлаждающих жидкостей, систем закрепления, режимов резания, норм времени на обработку и др. на основе разработанных авторами таблиц и классификации индукторов и специализированных приспособлений для магнитно-абразивной обработки. Для наполнения и поддержания базы данных в актуальном состоянии был разработан редактор базы данных, предоставляющий пользователю удобный интерфейс для просмотра и изменения информации, хранящейся в базе данных.

3. Результаты и обсуждения

Применение создаваемой автоматизированной системы подбора инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки изделий группового технологического процесса будет возможно при использовании, как всего функционала, так и отдельных модулей.

4. Выводы

В результате применения программы пользователю будет представлен отчет в виде спецификации на выбранную инструментальную оснастку с рассчитанными режимами резания, траекторией движения инструмента, техническим нормированием, ФСА-анализом операции и списком альтернатив инструментальной оснастки с оценками предпочтения выбора по критериям.

Список литературы

1. *Аверченков В.И., Аверченков А.В., Терехов М.В., Кукло Е.Ю.* Автоматизация выбора режущего инструмента для токарных станков с ЧПУ: монография. М.: ФЛИНТА, 2011. 151 с.

2. *Хомич Н.С.* Магнитно-абразивная обработка изделий: монография. - Мн.: БНТУ, 2006. - 218 с.

AUTOMATED SELECTION TOOL FOR OPERATIONS MAGNETIC ABRASIVE MACHINING OF COMPLEX SURFACES

Tatarkin E.Yu., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: etatarkin@mail.ru
Ikonnikov A.M., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: iamagtu@mail.ru
Schrayner T.A., M.Sc. (Engineering), e-mail: tasha-astu@mail.ru

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Prospect Lenina, Barnaul, 656038, Russian Federation

Abstract: The article describes the main criteria for automated selection of optimal tool for magnetic abrasive machining of parts to group technology. To reduce labor and material costs associated with the selection tool, an algorithm for automated selection of tool and software modules described. The result of the application program, the user will see the report in the form of specifications for the selected tool with the calculated cutting conditions, tool path, technical norm, value engineering of the operation and a list of possible alternative tools with the estimates of selection criteria.

Keywords: magnetic abrasive machining, group technology, tooling, production engineering, computer-aided design (CAD), CNC equipment.

УДК 621.438-46

СУЩНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Ан. А. Тихонов
Ал. А. Тихонов
Н. С. Шляхов
(ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Донской государственный технический университет (ДГТУ)
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
e-mail: tikhonov.aleksandr.47@mail.ru

Аннотация: В докладе представлены технологические возможности реактивного процесса обработки воды. Индивидуальное взаимодействие абразивной частицы с обрабатываемой поверхностью рассматривается на реактивных гидроабразивной обработки. Влияние зернистости абразива, предел текучести материала детали, угол движения частицы относительно поверхности, динамическое давление суспензии.

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, единичное взаимодействие, съём металла, влияние зернистости, сущность процесса, резание связанным абразивом, применение гидроабразивной обработки.

Развитие машиностроения на современном этапе невозможно без постоянного повышения производительности труда и улучшения качества выпускаемых изделий. В машиностроении все более широкое применение находят методы обработки абразивным инструментом. Абразивная обработка позволяет обеспечить требуемые точность и качество деталей при высокой производительности, а также высокую надежность и долговечность машин в процессе эксплуатации, поэтому роль абразивных операций в современном машиностроении непрерывно возрастает. Разработка и внедрение новых технологических процессов абразивной обработки подчинены общей задаче дальнейшего повышения качества изделий при обеспечении высокой эффективности производства.

В машиностроении необходимость обработки сложных фасонных поверхностей привела к созданию новых методов обработки. В этих методах в роли инструмента выступает либо электрическое поле (электрохимическая размерная обработка, электрополирование), либо направленный поток различных материалов (пескоструйная, дробеструйная обработки, обработка шариками и т. д.) на заготовку. Процессы, использующие эффект удара абразивных

1) удар производится собственно абразивной частицей (пескоструйная обработка);

2) удар производится абразивно-жидкостной струей (струйная гидроабразивная обработка);

3) воздействие на обрабатываемую поверхность взвешенных абразивных частиц,

Распыляемых сжатым воздухом (турбоабразивная обработка) или магнитным полем (магнитоабразивная обработка).

Процесс струйной гидроабразивной обработки (ГАО) заключается в направлении струи суспензии, состоящей из воды и частиц абразивных материалов, на обрабатываемую поверхность заготовки. Эта струя подвергается воздействию потока сжатого воздуха, который увеличивает скорость истечения суспензии из сопла. В результате такой обработки образуются чистые матовые поверхности, без направленных рисок, характерных для лезвийной обработки материалов. Действие режущих кромок абразивных частиц на обрабатываемую поверхность непродолжительно и имеет ударный характер.

При высокой скорости струи суспензии этот способ имеет только то общее с пескоструйной обработкой, что в обоих случаях работа по удалению металла производится за счет кинетической энергии абразивной частицы.

Химически активные вещества, добавленные в суспензию, улучшают воздействие абразивных частиц на обрабатываемую поверхность, процесс ускоряется и количество удаляемого металла увеличивается.

Компактность струи суспензии определяет площадь сечения струи при встрече с обрабатываемой поверхностью и при прочих равных условиях является главным фактором, обеспечивающим наибольшее удельное давление струи суспензии на заготовку. Движение струи сопровождается бомбардировкой обрабатываемой поверхности абразивными частицами.

В отличие от процессов резания связанным абразивом, после которых на обработанной поверхности остаются риски и микротрещины, струйная гидроабразивная обработка не создает направленной шероховатости, обеспечивает упрочнение обрабатываемой поверхности, вследствие чего повышается усталостная прочность обработанных деталей.

Все процессы механической обработки металла сопровождаются развитием значительных усилий и выделением в зоне резания большого количества тепла, вызывающего пластическую деформацию поверхностного слоя. При струйной гидроабразивной обработке температура обрабатываемых деталей не изменяется. Микронагрев, вызываемый отделением стружки абразивной частицей, устраняется потоком суспензии, сопровождающим эту абразивную частицу.

Струйную гидроабразивную обработку целесообразно применять для обработки сложных поверхностей: помимо значительного снижения времени обработки этот способ позволяет осуществить механизацию процесса отделочных операций и улучшить условия труда.

Сущность процесса струйной гидроабразивной обработки заключается в том, что на обрабатываемую поверхность детали направляется со значительной скоростью струя абразивных зерен и суспензии, которые, обладая определенной кинетической энергией, при соударении с поверхностью совершают работу, изменяя состояние этой поверхности.

Характер взаимодействия абразивных частиц, находящихся в струе, с поверхностью определяет выходные параметры процесса - производительность и качество обработки. В плане абразивного воздействия струйную гидроабразивную обработку можно рассматривать как процесс эрозии потоком абразивных частиц обрабатываемой поверхности. Для установления физической картины явлений, происходящих при изнашивании пластичного материала потоком абразивных частиц, необходимо первоначально рассмотреть износ, вызываемый ударом одиночной частицы.

Удар частицы о поверхность приводит к возникновению кратера. Исследование кратеров, образующихся при ударах частицы под разными углами атаки, показало, что вытесненный из кратера материал течет в направлении падения частицы с образованием вала до тех пор, пока он не растрескивается из-за значительных быстродействующих накопленных деформаций. При ударах под углом 90° вал располагается вокруг кратера равномерно, при меньших углах атаки вал образуется по бокам кратера и по направлению движения частицы. Характер деформаций и образование вала зависят от формы частицы, ее ориентации при контакте с поверхностью, скорости частицы, угла ее падения, а также от свойств материалов частицы и поверхности. Было обнаружено существование критической скорости частицы, выше которой материал обрабатываемой поверхности вытесняется в вал кратера, а также наличие вокруг кратера, образовавшегося при ударе, зоны высокой плотности дислокаций (обычно толщиной в несколько микрометров) [1].

При ударе о поверхность угловатой частицы наблюдается процесс микрорезания материала. Микрорезание производится только вершинами абразивных частиц (зерен) и из-за скоротечности и направленности ударного воздействия оно носит очень специфический характер. При ударах угловатые частицы либо вытесняют больше материала в вал кратера, где он становится уязвимым для дальнейшей эрозии, либо отделяют материал от поверхности (в зависимости от угла скоса частицы при контакте).

Удаление материала при воздействии на обрабатываемую поверхность потока абразивных частиц происходит в результате взаимодействия нескольких одновременно протекающих процессов, обусловленных отдельным или совместным влиянием компонентов потока этих частиц. При рассмотрении эрозии материала струей абразивных частиц необходимо учитывать: соударения частиц между собой внутри набегающего потока; дробление отдельных частиц; экранирование обрабатываемой поверхности отскакивающими от нее частицами; широкий диапазон углов падения частиц в определенный момент времени; влияние обрабатываемой поверхности на траекторию движения абразивных частиц; подповерхностное повреждение материала вследствие многократных ударов абразивными частицами; адсорбционный эффект понижения прочности обрабатываемого материала на границе раздела обрабатываемой поверхности и потока и т. д. [2].

Тонкости процессов деформации и разрушения материала, протекающих при многократных ударах частиц по обрабатываемой поверхности, все еще до конца не изучены. На основании отдельных исследований осколков, образовавшихся в результате эрозии пластичных материалов, было сделано предположение, что путем непосредственного срезания материала при ударе о него абразивной частицы перемещается лишь небольшое количество материала. Обширная пластическая деформация вызывается воздействиями пропахивающего типа (образование вала), при этом смещенный материал создает топографию поверхности, с которой металл может быть удален последующими ударами частиц [3].

Наблюдается резкое количественное и качественное различие между процессами эрозии в присутствии жидкости и без нее. При удалении

материала абразивной струей происходят следующие процессы: разрушение обрабатываемой поверхности в результате высоких контактных напряжений; срезание микростружки с поверхности; образование клиновидных трещин в поверхностном слое обрабатываемой поверхности; гидроудар; контактная усталость. Относительная роль каждого из этих явлений определяется физико-механическими свойствами материала обрабатываемой детали и абразивных частиц, скоростью и углом атаки абразивной струи [4]. Области возможного применения гидроабразивной обработки при изготовлении и ремонте деталей показаны на рис. Целесообразно гидроабразивную обработку применять и для окончательной обработки канавок режущих инструментов (сверл, зенкеров и др.), полостей матриц и т. п.

Гидроабразивная обработка применяется при отделке крыльчаток компрессоров, колец подшипников, шатунных болтов, зубьев колес, лопаток турбин и направляющих аппаратов, деталей приборов, режущего инструмента, штампов, постоянных форм для литья, волочильных фильтров, шатунов двигателей внутреннего сгорания и т. п. зубьев колес и окончательной отделки рабочих поверхностей цилиндров автомобильных и авиационных двигателей. В этом случае время приработки цилиндров сокращается и срок их службы увеличивается. Гидроабразивная обработка подшипников скольжения способствует удержанию масляной пленки и снижает износ трущихся поверхностей. Гидроабразивная обработка способствует улучшению сцепления нанесенных на поверхность детали слоев металлических покрытий, краски, резины, клея.

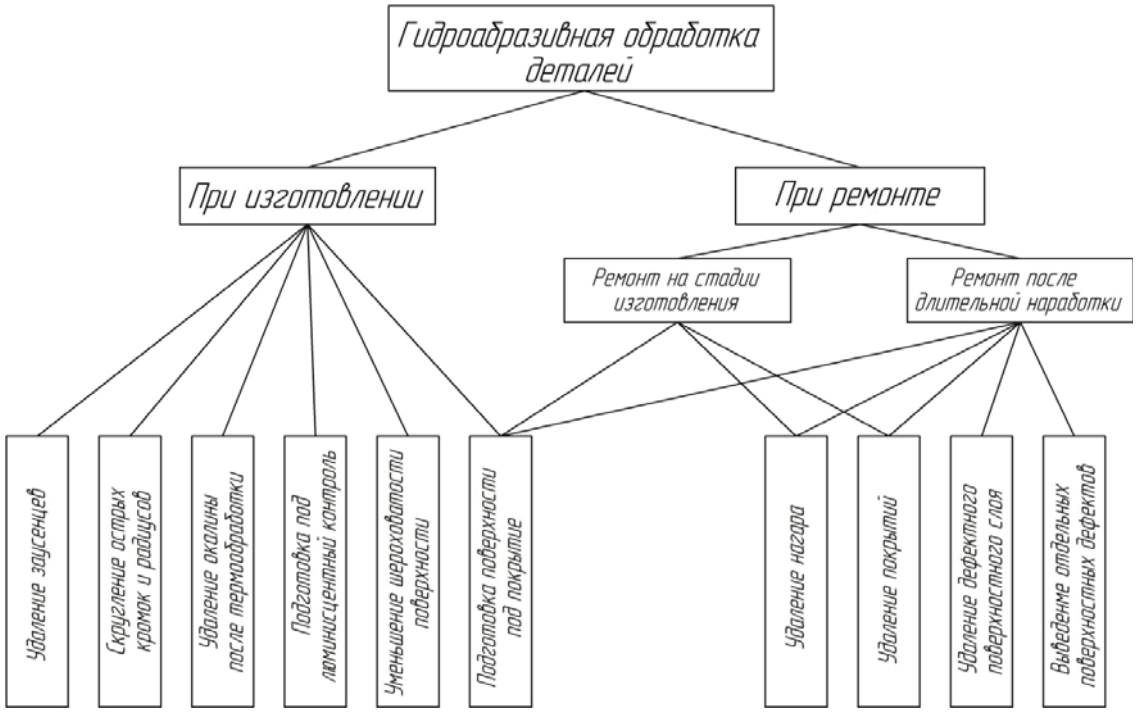


Рисунок 1 - Области возможного применения струйной гидроабразивной обработки при изготовлении и ремонте деталей

Гидроабразивную обработку применяют также после сварки и пайки, для зачистки швов и удаления загрязнений. Эффективен процесс очистки пружин без опасности появления водородной хрупкости, которая возникает при кислотном травлении. Заусенцы, окалину и грубую шероховатость во внутренних полостях сложных поковок и отливок можно экономично и эффективно удалить путем гидроабразивной обработки. При применении этой обработки можно устранить риски, возникшие в процессе штампования или шлифования, остатки шлифовального состава, очистить поверхности деталей из легких сплавов, отлитых в песчаных формах.

При гидроабразивной обработке макропрофиль медленно изменяется и лишь перемещается как бы параллельно самому себе, в глубь детали. Если часть поверхности оставить незащищенной и подвергнуть действию струи, то весь макропрофиль, сохранив свой контур в несколько размытом виде, опустится. Величина этого опускания пропорциональна времени действия струи [5].

При гидроабразивной подготовке под покрытие детали металлами с ее поверхности устраняется оксидная пленка и загрязнения, удаляются неровности и образуются мельчайше кратеры, создающие хорошо подготовленную

поверхность для нанесения хрома или другого металла.

Можно указать следующие основные направления применения гидроабразивной обработки:

1) отделка деталей особо сложной конфигурации;

2) уменьшение шероховатости поверхности при соблюдении высокой точности изготовления детали;

3) получение чистой поверхности без направленных следов обработки, с созданием наклепа для повышения усталостной прочности;

4) получение поверхностей с высокой капиллярностью для повышения износостойкости и сцепления с покрытиями и красками;

5) увеличение стойкости инструмента устранением следов механической обработки;

6) удаление окалины, ржавчины и очистка поверхностей от загрязнения;

7) снятие заусенцев и грата.

Список литературы

1. *Шманев В.А., Шулепов А.П.,* Мещеряков А.В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД – М.: Машиностроение, 1995.-144с.

2. *Рао, Бакли* Связь между эрозионной стойкостью пластичных материалов при эрозии, вызванной твердыми частицами, и их свойствами // Труды американского общества инженеров-механиков. Сер. Энергетические машины и установки. 1985. № 3. С. 83-96.

3. *Виноградов В.Н. Сорокин Г.М.,* Албагагиев А.Ю. Изнашивание при ударе/ - М.: Машиностроение, 1982. - 192 с.

4. *Табаков В., Балан С.* Изучение механизма разрушения поверхности материалов под действием эрозии // Труды американского общества инженеров - механиков. Сер. Энергетические машины и установки. 1983. № 4. С. 106-110.

5. *Билик Ш.М.* Абразивно-жидкостная обработка металлов. – М.:Машгиз, 1960. – 198с.

ESSENCE AND TECHNOLOGICAL CAPABILITIES GIDROABRA-INVASIVE TREATMENT

An. A. Tikhonov
Al. A. Tikhonov
N. S. Shlyakhov
Russia, DSTU
e-mail: tikhonov.aleksandr.47@mail.ru

Abstract: The report presents the nature technological possibilities of process water jet machining. individual interaction of an abrasive particle with a processed surface is considered at jet hydroabrasive processing. Influence of granularity of an abrasive, a limit of fluidity of a material of a detail, a corner of movement of a particle concerning a surface, dynamic pressure of suspension is considered. Reviewed the differences of water jet machining from processes cutting connected abrasives. Presented the main directions the use of water jet machining to manufacture and repair details.

Key words: water jet machining, single interaction, removal of metal, the influence of grit, nature of the process, cutting connected abrasives, the use of water jet machining.

УДК 621.757

ПРИБЛИЖЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

М.В. ВАРТАНОВ, доктор техн. наук, профессор,
Л.В. БОЖКОВА, доктор техн. наук, профессор,
(Университет машиностроения, г. Москва)

Вартанов М.В. –107023 г. Москва, ул. Б. Семеновская, д. 38,
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)
e-mail: iptm@mami.ru

Аннотация: В статье рассматривается математическая модель процесса роботизированной сборки с применением адаптации и низкочастотных колебаний в форме уравнений Лагранжа второго рода.

Ключевые слова: роботизированная сборка, низкочастотные колебания, адаптивный схват

Роботизированная сборка профильных и пазовых соединений является более сложным, в сравнении с цилиндрическими соединениями, случаем. В общем случае она требует совмещения контуров детали относительно оси, либо плоскости симметрии соединения. Как правило, данная задача решается на втором этапе, после совмещения осей симметрии [1, 2, 3]:

$$\begin{aligned} \delta_\Sigma &\le \delta_0 \\ \varphi_\Sigma &\le \varphi_0 \end{aligned} \qquad (1)$$

где δ_Σ – возникающая погрешность совмещения осей собираемых деталей;
δ_0 – допустимая погрешность положения деталей;
φ_Σ – возникающая погрешность углового положения контуров собираемых деталей;
φ_0 –допустимая погрешность углового положения.

Технически задача может решаться на основе двух известных подходов – на основе пассивной и активной адаптации. В первом случае используют различные виды дополнительных воздействий, приводящих к вращению одной из деталей [4, 5, 6].

Ведутся работы и в направлении изучения и применения методов активной адаптации, основанных на применении систем с обратной связью, оснащенных силомоментными датчиками и техническим зрением [7, 8, 9, 10]. Применение систем активной адаптации является бесспорно перспективным. Однако подобные системы достаточно сложны и их реализация связана со значительными техническими трудностями и экономическим затратами.

Области применения активных и пассивных средств адаптации зависят от многих факторов: точность соединения, быстродействие, нагрузочная способность, надежность. Вопросы определения границ применения различных методов пассивной адаптации в статической и квазистатической постановке рассмотрены в работе [11]. Задача оценки точностных возможностей активных средств адаптации, реализующих позиционное управление рассмотрена в работе [8].

В работе [12] был предложен и исследован метод роботизированной сборки с применением адаптации и низкочастотных колебаний. Была экспериментально подтверждена эффективность метода при сборке профильных бесфасочных соединений с зазором более 0,01 мм. Расчетная схема имела вид, показанный на рисунке 1.

Вибродиск совершает низкочастотные колебания относительно осей ξ и η по законам:

$$\begin{aligned} \psi &= A \cdot \sin kt \\ \varphi &= A \cdot \cos kt \end{aligned} \qquad (2)$$

где A – амплитуда колебаний;
k – круговая частота.

Дифференциальные уравнения относительного движения центра масс детали (по отношению к вибродиску) имело вид

$$\overrightarrow{ma}_{cr} = \overrightarrow{mg} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{F}_{\text{упр}} + \vec{F}_{ce}^{\text{ин}} + \vec{F}_{ck}^{\text{ин}} + \vec{P} \qquad (3)$$

где $\vec{F}_{ce}^{\text{ин}}$ – переносная сила инерции центра масс детали;
$\vec{F}_{ck}^{\text{ин}}$ – кориолисова сила инерции центра масс детали.

Полученные в работе [12] уравнения движения профильной детали могут быть существенно упрощены с учетом того, что колебания происходят с малыми амплитудами. Приближенно можно считать, что

$$\begin{aligned} \sin\psi &\approx \psi, \quad \sin\varphi \approx \varphi \\ \cos\psi &= 1, \quad \cos\varphi = 1 \end{aligned} \qquad (4)$$

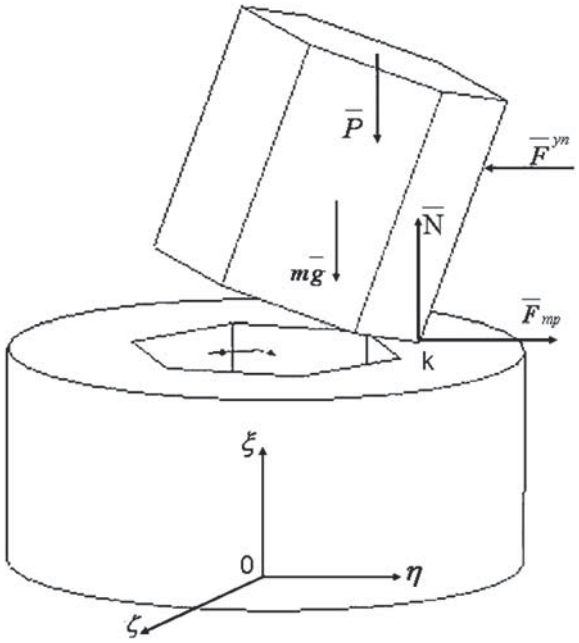


Рисунок 1 – Расчетная схема сил, действующих на деталь при одноточечном контакте с вибродиском

В результате дифференциальные уравнения движения центра масс цилиндрической профильной детали при наличии ее контакта с плоскостью ориентирующего диска на основании (4) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi}_c &= p\cdot\psi - c(\xi_c + Z_{c4}\cdot\psi) - fN\frac{\dot{\xi}_k}{\sqrt{\dot{\xi}_k^2+\dot{\eta}_k^2}} + m(\xi_c\dot{\psi}^2 - \eta_c\ddot{\psi}\cdot\varphi - 2\eta_c\dot{\varphi}\dot{\psi} - \\ &- 2\dot{\eta}_c\omega\dot{\varphi}\varphi - \zeta_c\ddot{\psi} + 2\zeta_c\dot{\varphi}\dot{\psi}\varphi - 2\zeta_c\omega\dot{\varphi} + \xi_c\omega^2 + \\ &+ \zeta_c\omega^2\psi) - 2m\dot{\zeta}_c(\dot{\psi}+\omega\varphi) + 2m\dot{\eta}_c(-\dot{\psi}\varphi+\omega); \\ m\ddot{\eta}_c &= -p\psi - c(\eta_c - Z_{c4}\varphi) - fN\frac{\dot{\eta}_k}{\sqrt{\dot{\xi}_k^2+\dot{\eta}_k^2}} + m(\xi_c\ddot{\psi}\varphi + \\ &+ \eta_c\dot{\varphi}^2 - 2\eta_c\omega\dot{\varphi}\psi + \zeta_c\dot{\psi}^2\varphi + \xi_c\ddot{\varphi} + 2\zeta_c\omega\dot{\psi}\psi - \\ &- 2\eta_c\omega\dot{\psi}\varphi - 2\zeta_c\omega\dot{\psi} + \eta_c\omega^2 - \zeta_c\omega^2\varphi) - 2m\dot{\xi}_c(-\dot{\psi}\varphi+\omega) + 2m\dot{\zeta}_c(\dot{\varphi}-\omega\psi); \end{aligned} \tag{5}$$

При этом нормальная реакция плоскости ориентирующего диска N будет иметь вид:

$$\begin{aligned} N &= m\ddot{\zeta}_c + c(\zeta_c - Z_{c4}) - m(\xi_c\omega^2\psi - \eta_c\omega^2\varphi - 2\zeta_c\omega\dot{\varphi}\cdot\varphi + \xi_c\ddot{\psi} + \\ &+ \eta_c\dot{\psi}^2\varphi - \eta_c\ddot{\varphi} + \zeta_c\dot{\psi}^2 + \zeta_c\dot{\varphi}^2 + 2\zeta_c\omega\dot{\psi}\varphi + 2m\dot{\eta}_c(\dot{\varphi}-\omega\psi) - \\ &- 2m\dot{\xi}_c(\dot{\psi}+\omega\varphi) + P; \end{aligned} \tag{6}$$

Производные по времени $\dot{\xi}_k$ и $\dot{\eta}_k$ при этом определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_k &= r\omega\cos\theta - r\sin\theta\cdot\psi\cdot\psi + l\psi + \dot{\xi}_c \\ \dot{\eta}_k &= r(\sin\theta\cdot\dot{\psi}\cdot\varphi + \sin\theta\cdot\psi\cdot\dot{\varphi} - \omega\sin\theta - \cos\theta\cdot\varphi\cdot\dot{\varphi}) - l\dot{\varphi} + \dot{\eta}_c. \end{aligned} \tag{7}$$

Функция ζ_c и ее первая и вторая производные по времени $\dot{\zeta}_c$ и $\ddot{\zeta}_c$ можно представить следующим образом:

$$\zeta_c = h - r(\sin\theta\cdot\psi - \cos\theta\cdot\varphi) + l\left(\cos\psi\sin\varphi\right), \tag{8}$$

$$\dot{\zeta}_c = -r(\cos\theta\cdot\omega\cdot\psi + \sin\theta\cdot\dot{\psi} + \sin\theta\cdot\omega\cdot\varphi - \cos\theta\cdot\dot{\varphi}) - l(\psi\dot{\psi} + \varphi\dot{\varphi}), \tag{9}$$

$$\ddot{\zeta}_c = -r(-\omega^2\psi\sin\theta + 2\omega\dot{\psi}\cos\theta - \sin\theta\cdot\psi(\dot{\psi}^2+\dot{\varphi}^2) - 2\dot{\psi}\dot{\varphi}\sin\theta\cdot\varphi + \\ + 2\omega\dot{\varphi}\sin\theta + \sin\theta\cdot\ddot{\psi} + (\omega^2+\dot{\varphi}^2)\cos\theta\cdot\varphi - \cos\theta\cdot\ddot{\varphi}) - \\ - l(\dot{\psi}^2 + \dot{\varphi}^2 + \ddot{\psi}\psi + \ddot{\varphi}\varphi) \qquad (10)$$

Приближенные выражения, определяющие закон движения точки контакта цилиндрической детали с плоскостью вибрационного диска, представим в виде:

$$\begin{cases} \xi_k = r\sin\theta + l\psi + \xi_c, \\ \eta_k = r\cos\theta - l\varphi + \eta_c. \end{cases} \qquad (11)$$

Приближенные дифференциальные уравнения движения центра масс цилиндрической профильной детали после ее отрыва от плоскости ориентирующего диска получены с учетом (4):

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi}_c &= -c(\xi_c + Z_{c4}\cdot\psi) + m\left[\xi_c\psi^2 - \eta_c\ddot{\psi}\cdot\varphi - 2\eta_c\varphi\dot{\psi} - 2\eta_c\omega\varphi\varphi - \zeta_c\ddot{\psi}\right. \\ &\quad \left. + 2\zeta_c\varphi\dot{\psi}\varphi - 2\zeta_c\omega\varphi + \xi_c\omega^2 + \zeta_c\omega^2\psi\right] - 2m\dot{\zeta}_c(\dot{\psi}+\omega\varphi) + \\ &\quad + 2m\dot{\eta}_c(-\dot{\psi}\varphi + \omega) + P\psi; \\ m\ddot{\eta}_c &= -c(\eta_c - Z_{c4}\cdot\varphi) + m\left[\xi_c\ddot{\psi}\varphi + \eta_c\varphi^2 - 2\eta_c\omega\varphi\psi + \zeta_c\dot{\psi}^2\varphi + \zeta_c\ddot{\varphi}\right. \\ &\quad \left. + 2\xi_c\omega\dot{\psi}\psi - 2\eta_c\omega\dot{\psi}\varphi - 2\xi_c\omega\dot{\psi} + \eta_c\omega^2\right] - 2m\dot{\xi}_c(-\dot{\psi}\varphi + \omega) + \\ &\quad + 2m\dot{\zeta}_c(\dot{\varphi} - \omega\psi) - P\varphi; \\ m\ddot{\zeta}_c &= -c(\zeta_c - Z_{c4}) + m\left[\xi_c\omega^2\psi - \eta_c\omega^2\varphi - 2\zeta_c\omega\varphi\psi + \xi_c\ddot{\psi} + \eta_c\dot{\psi}^2\varphi - \right. \\ &\quad \left. - \eta_c\ddot{\varphi} + \zeta_c\psi^2 + \zeta_c\dot{\varphi}^2 + 2\zeta_c\omega\dot{\psi}\varphi\right] - 2m\dot{\eta}_c(\dot{\varphi} - \omega\psi) + \\ &\quad + 2m\dot{\xi}_c(\dot{\psi} + \omega\varphi) - P. \end{aligned} \qquad (12)$$

Следует отметить, что приближенные соотношения (4) ÷ (12) получены с точностью до величины первого порядка малости относительно углов ψ и φ.

Уравнения (11), определяющие закон движения точки контакта по плоскости вибрационного диска, могут быть представлены в виде:

$$\left.\begin{aligned} \xi_k &= r\sin\theta + \xi_c + lA\sin kt \\ \eta_k &= r\cos\theta + \eta_c - lA\cos kt \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

Исключая из (13) параметр *t*, получим уравнение траектории точки контакта собираемых деталей относительно плоскости ориентирующего диска.

$$\left[\xi_k - (\xi_c + r\sin\theta)\right]^2 + \left[\eta_k - (\eta_c + r\cos\theta)\right]^2 = A^2\cdot l^2 \qquad (14)$$

Как следует из (14), траекторией точки контакта (точки "к") по плоскости вибрационного диска будет окружность с центром в точке, имеющей координаты ($\xi_c + r\sin\theta$, $\eta_c + r\cos\theta$). При этом радиус этой окружности,

$$R = A\cdot l \qquad (15)$$

Так как координаты центра масс детали ξ_c, η_c и угол θ непрерывно меняются, то непрерывно будет изменяться положение центра окружности, описываемой точкой контакта К.

В силу того, что амплитуда вибрационных колебании А является малой величиной то радиус этой окружности, определяемый по (15), тоже будет малой величиной.

Созданная математическая модель в дальнейшем будет использована для разработки программного обеспечения и проведения моделирования процесса.

Список литературы

1. *Понс А.К., Лобзев Б.А.* Определение условий автоматической сборки деталей нецилиндрической формы. Автоматизация сборочных процессов вып.5, Рига. 1976 г. Стр.36-44

2. *Acai T., Makio H.* Analysis of part insertion mith complicated shapes. Annals of the CIRP Vol.38/1/1989, p.17-20.

3. Машиностроение. Энциклопедия. Том III-5 Технология сборки в машиностроении. Гусев

А.А., Павлов В.В. и д.р. Под общ. Редакцией Соломенцева Ю.М., 2001 – 640 с.

4. *Житников Ю.З., Симаков А.Л.,* Житников Б.А. Разработка и обоснование метода пассивной адаптации деталей, сопрягаемых по резьбовым поверхностям. Материалы 2-го Международного научно-технического семинара: «Современные методы сборки в машиностроении», Киев, 2002, стр. 28-29

5. *Бедрин В.М. Бедрина А.В.* Пневмновихревой метод ориентирования деталей. Сборка в машиностроении, приборостроении, 2000, №3, стр.27-34.

6. *Vartanov M.V., Bozhkova L.V., Bakena Mboa J.C. r*obot assembly of complex shaft on the basis of passive adaptation and low-frequency vibration. Russian engineering research, 2010, vol.30, №11, p. 1092-1094.

7. *Симаков А.Л.* Обоснование методов и средств адаптации соединяемых деталей на основе принципов автоматического управления и выявленных взаимосвязей при автоматизированной сборке – Дисс. д.т.н., Ковров, 2003.

8. *Симаков А.Л., Житников Б.Ю.* Погрешность позиционирования активных средств для автоматизированной сборки. «Сборка в машиностроении, приборостроении», 2004, №1, стр. 30-34.

9. *Сироткив А.А.* Обеспечение автоматизированной сборки. «Прогрессивные технологии в машиностроении» (Сборник научных трудов) – Челябинск, 2011, стр. 26-32.

10. *Воротников С.А., Михайлов Б.Б.,* Ющенко А.С. Дистанционное управление адаптивными роботами: состояние и перспективы. «Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды Восьмой Всероссийской научно- технической конференции», том 5-СПб, 2005, стр. 79-84.

11.*Симаков А.Л.* Обоснование границ применения методов адаптации при автоматизированной сборке. «Сборка в машиностроении, приборостроении», 2001, №3, стр. 14-16.

12. *Бакена Мбуа Ж.К.* Совершенствование технологии роботизированной сборки профильных соединений с зазором на основе средств адаптации. Дисс. на соискание степени к.т.н. – М., МАМИ, 2012.

APPROXIMATE MATHEMATICAL MODEL OF ROBOTIC ASSEMBLY A PROFILE CONNECTIONS

Vartanov M.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: iptm@mami.ru
Bojkova L.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: bojkova@mami.ru

Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI), 38 street B. Semenovskaya, Moscow, 127023, Russian Federation

Abstract: The article discusses a mathematical model of the robotic assembly with adaptation and low-frequency oscillations in the form of Lagrange equations of the second kind

Keywords: Robotic assembly, low-frequency oscillations, adaptive gripper

УДК 621.757.621.787.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО - ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ДОРНОВАНИЯ ОТВЕРСТИЯ В КОРПУСЕ С ОДНОВРЕМЕННОЙ ЗАПРЕССОВКОЙ ВТУЛКИ

И.И. ЯТЛО - какд .техн. наук. доцент.
И.С. БУКАНОВА - какд .техн. наук. доцент.
(АлтГТУ, г. Барнаул. Россия)

656038. г. Барнаул. пр-т Ленина. 46.Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. e-mail: agtu-otv2010@mail.ru

Аннотация: Представлена методика определения остаточных деформаций с применением программного комплекса «DEFORM» применительно к операции дорнования корпуса неподвижного соединения с одновременной запрессовкой втулки.

Ключевые слова: соединение, напряжения, деформации, компьютерное моделирование.

Технология получения прессовых соединений, предусматривающая запрессовку втулок совместно с дорнованием посадочных отверстий корпусов, позволяет расширить допуск на диаметральный размер посадочного отверстия корпуса и совместить в один технологический переход окончательную обработку посадочного отверстия корпуса и запрессовку в него втулки. При запрессовке втулка устанавливается на хвостовик дорна (рис.1), который при приложении усилия, перемещаясь по каналу отверстия, своим заборным конусом раздаёт его до размеров цилиндрической ленточки.

Ввиду наличия упругих связей, отверстие корпуса после прохождения цилиндрической ленточки дорна стремится восстановить прежний диаметр, но движущаяся непосредственно за цилиндрической ленточкой втулка препятствует возвращению упруго деформированных слоёв металла корпуса в прежнее состояние. Вследствие этого на сопрягаемых поверхностях возникает контактное давление, обеспечивающее необходимую прочность соединения.

При данной технологии получения прессового соединения контроль величины упругой деформации, создающей контактное давление в стыке в процессе получения соединения, не представляется возможным. Определение этой величины целесообразно производить косвенно - путём контроля диаметра предварительного отверстия корпуса. В связи с этим необходимо знать зависимость радиальной упругой деформации по отверстию от натяга дорнования. Эта зависимость находится экспериментально или аналитически при вычитании от натяга дорнования величины остаточной деформации, определяемой по зависимостям работы [2]. При расчёте диаметр дорна принимается равным величине максимального наружного диаметра втулки.

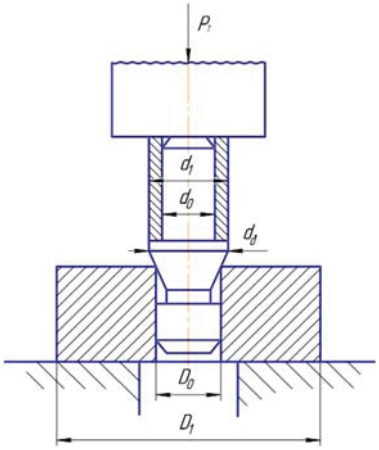


Рисунок 1 - Схема получения прессового соединения при запрессовке втулки совместно с дорнованием посадочного отверстия корпуса

Для снижения трудоёмкости проектирования технологических процессов дорнования необходимо иметь модель напряженно - деформированного состояния (НДС), формирующегося в результате обработки. С распределением остаточных деформаций и напряжений связаны также эффективность обеспечения точности деталей и качества их поверхностного слоя.

Модель НДС должна обеспечивать возможность прогнозирования остаточных напряжений и деформаций (ОНД) с учетом начального напряженно - деформированного состояния, имевшегося в заготовке перед обработкой. Изменение НДС цилиндрических деталей при дорновании отверстий происходит в результате упруго - пластического деформирования.

Решение подобных задач рассматривалось Проскуряковым Ю.Г., Мазеиным П. Г. [1, 2]. Современные методы прогнозирования остаточных деформаций при упруго - пластическом деформировании базируются на основных положениях теории упругости. Большая часть этих методов носят эмпирический характер. Решение задач в упруго - пластической области трудоёмко, т.к. требует умения решать математические задачи высокого уровня.

Разработка комплексного подхода для решения задач в упруго -пластической области, с целью минимизации затрат времени при решении практических задач путем компьютерного моделирования, становится актуальным. В данной работе предлагается решение задачи применительно к операции дорнования корпуса неподвижного соединения с одновременной запрессовкой втулки. Целью работы является разработка решения задачи по определению остаточных деформаций в упругом неоднородном цилиндре, нагруженном равномерным внутренним давлением.

«DEFORM» - система конечно-элементного (КЭ) моделирования, которая предназначена для анализа трехмерного течения металла при различных процессах обработки металла давлением. «DEFORM» - практичный и эффективный инструмент, позволяющий прогнозировать характер формообразования при операциях поверхностного пластического деформирования (ППД) металлов без существенных затрат на экспериментальное исследование.

Благодаря моделированию процессов ППД на ЭВМ программный комплекс DEFORM также позволяет пользователям:
- снизить долю затрат на испытания и модернизацию процессов и оснастки;
- усовершенствовать конструкцию инструмента, чтобы уменьшить стоимость его производства и расход материала;
- сократить затраты по времени от начала проектирования до внедрения готового решения.

Очень важную роль в достижении требуемой точности решения задачи играет задание достоверных и приближенных к реальным условиям данных о свойствах материалов соединения (табл. 1).

Таблица 1 – Свойства материалов соединения

Деталь соединения	Материал	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Твердость НВ
Втулка	Bracc-CDA-110 (БрО5Ц5С5)	88300	0.33	57
Корпус	AISI-1045 (сталь 45)	200000	0.30	187

При дорновании корпуса с одновременной запрессовкой втулки натяг запрессовки обеспечивается за счет упругой деформации отверстия корпуса. Размеры дорна и деталей соединения при моделировании приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Размеры дорна и деталей соединения при моделировании

	Тест 1	Тест 2	Тест 3
Диаметр дорна, мм	25.184	25.25	25.31
Диаметр втулки, мм	25.184	25.25	25.31
Диаметр корпуса, мм	25,0	25,0	25,0
Натяг дорнования, мм	0,184	0,250	0,310

На рисунке 2 представлено создание геометрии соединения при дорновании отверстия в корпусе с одновременной запрессовкой втулки. Детали соединения и инструмент можно импортировать из внешних источников, предварительно создав в пакете твердотельного моделирования, например, SolidWorks.

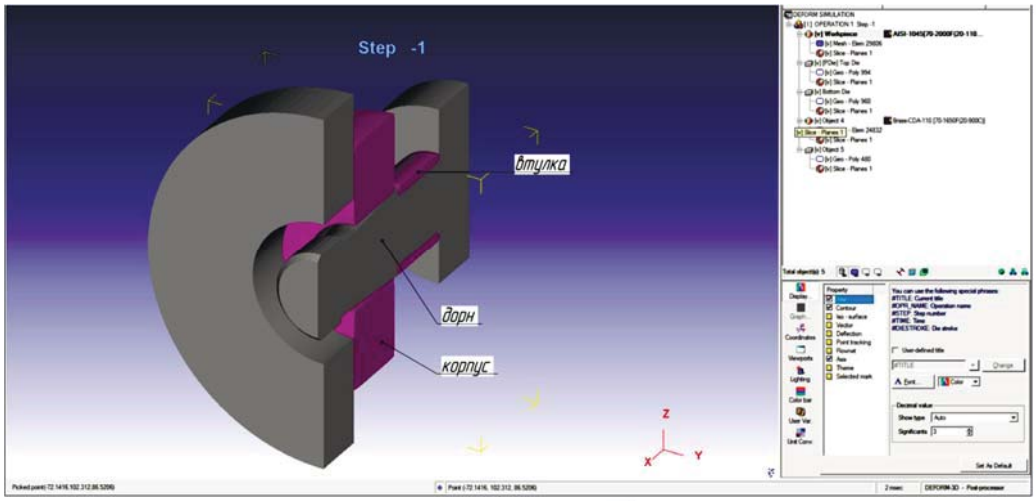


Рисунок 2 - Создание геометрии соединения при дорновании отверстия в корпусе с одновременной запрессовкой втулки

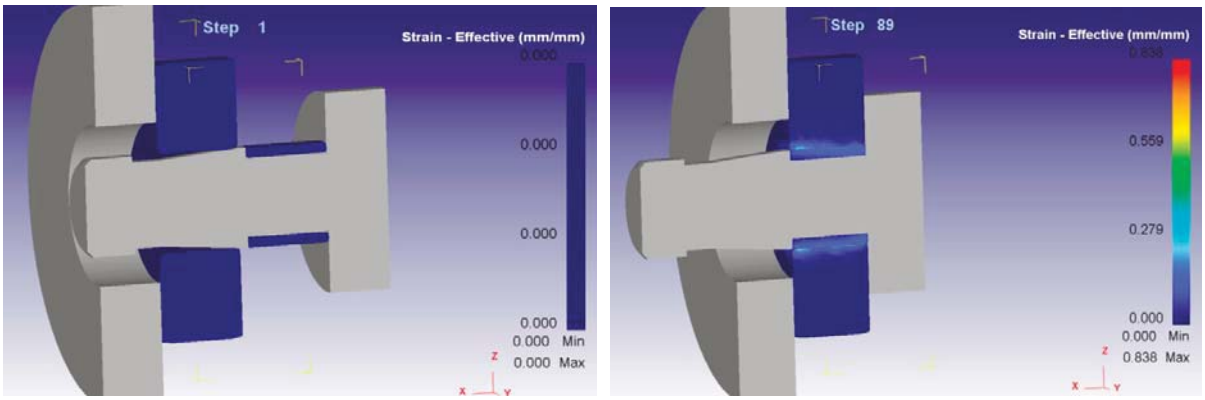
Полученная геометрия используется для создания сетки КЭ заготовок, а также для определения рабочих поверхностей инструмента (дорна).

На экране **(MainWindow)** отображается сразу несколько типов информации:

1.Визуализация процесса ППД, включая изменение геометрии объектов или их сетки КЭ (рис. 2);

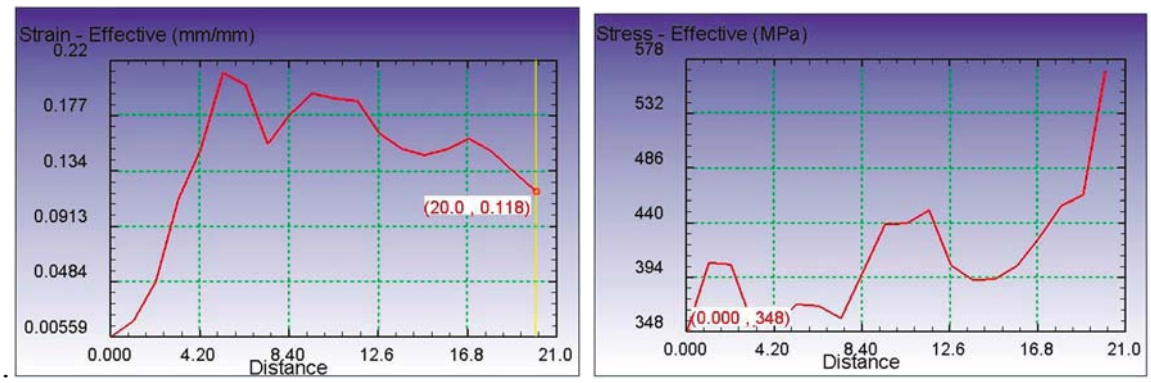
2. Нанесение на объекты эпюр напряжений, деформаций и т.д. с выводом шкалы значений (рис. 3);

3. Вывод графиков зависимости параметров процесса от времени или шага расчета (рис. 4).



а) б)

Рисунок 3 - Изменение геометрии объектов на первом (Step 1) – (а) и последнем (Step 89) – (б) шаге моделирования



а) б)

Рисунок 4 – Распределение деформаций (а) и напряжений (б) по длине соединения для условий теста 1.

Когда выполнены все предварительные условия для начала расчета, можно начинать процесс создания файла базы данных **(Database)**, который будет уже использоваться в программе **Simulator** (Процессор).

Постпроцессор **(PostProcessor)** используется для анализа результатов, полученных после выполненных расчетов в Процессоре. Постпроцессор позволяет наблюдать за происходящими изменениями в заготовке, а также анализировать напряженно - деформированное состояние объекта и другие параметры процесса. С помощью Постпроцессора можно также получить графические и числовые данные для дальнейшего использования в других приложениях.

Значения напряжений и деформаций в соединении, полученные по результатам компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM-3D, показали хорошую сходимость с результатами аналитического расчёта и экспериментальными данными, но без существенных затрат на экспериментальное исследование и решения трудоёмких математических задач высокого уровня.

Список литературы

1. *Мазеин П. Г.,* Моделирование формирования остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании стальных деталей. Текст.: Автореф. дисс. докт. техн. наук / П.Г. Мазеин, ЧГТУ, Челябинск, 1994.

2. *Проскуряков Ю.Г.* Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. М.: Машиностроение, 1971, - 208 с.

SIMULATION OF STRESS - STRAIN OF CO STOYANOV BURNISHING HOLES IN HOUSING WITH SINGLE-TIME PRESSING SLEEVES

II YATLO - assistant professor.
IS Bukanova - assistant professor.
(Altai State Technical University, Barnaul. Russia), 656038. Barnaul. Lenin Prospect. 46.Altaysky State Technical University. II Polzunova, e-mail: agtu-otv2010@mail.ru

Abstract: A method for determination of residual deformation with pro-program complex «DEFORM» in relation to the operation of the fixed body dornovanija Port-tion with simultaneous press-fitting sleeves.

Keywords: Connect, stress, strain, computer simulation.

УДК 621.7

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ КОЛЬЦЕРАСКАТКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОБОДЬЕВ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ ГРУЗОПОДЬЕМНОСТЬЮ 90-450 ТОНН

В. В. РУДЫЙ

ОАО «БЕЛАЗ»- управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ»,
ул. 40 лет Октября, 4, Жодино, Минская область, Республика Беларусь, 222161
e-mail - viktor.rudy@gmail.com

Аннотация: Рассмотрены особенности технологических и силовых параметров кольцераскатки элементов обода колес – основания. Проанализированы конструкторские и технологические требования к элементам обода колес при изготовлении их с использованием кольцераскатки. Конструкция основания обода допускает применение сварного варианта. Проведенный сравнительный анализ прочностных свойств и ресурса сварных и цельнокатаных ободьев показал, что для варианта сварного основания обода максимально возможный пробег находится в пределах 300 000 км, для варианта цельного основания обода обеспечивается расчетный ресурс пробега до 1 000 000 км.

Ключевые слова: кольцераскатка, обод колеса, карьерный самосвал

Введение

Обод колеса карьерного самосвала состоит из деталей в форме колец или дисков, что позволяет применить процесс кольцераскатки для этих деталей. На рис. 1 показан общий вид обода колеса, который используется в карьерных самосвалах.

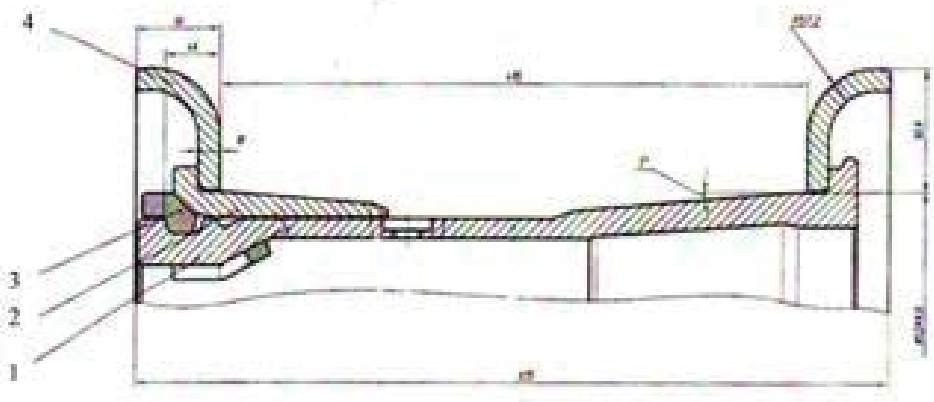


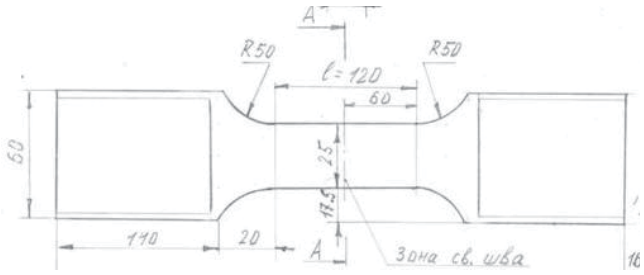
Рисунок 1 – Общий вид обода колеса карьерного самосвала: 1-основание обода, 2-кольцо посадочное, 3 - кольцо замочное, 4- кольцо бортовое

Конструкция основного элемента обода – основания, допускает применение сварного варианта, однако при этом необходимо выполнение ряда требований по обеспечению качества сварного шва и снятия внутренних напряжений.

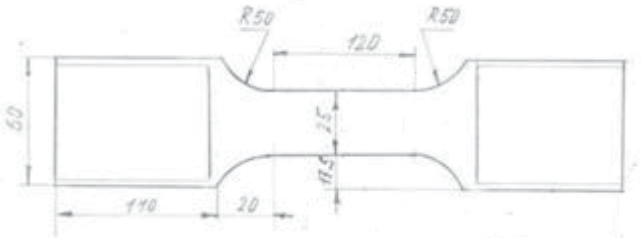
Обод колеса карьерного самосвала состоит из деталей в форме колец или дисков, что позволяет применить процесс кольцераскатки для этих деталей. Технические требования к деталям обода колес карьерных самосвалов регламентированы ГОСТ 26147-84 (СТ СЭВ 3732-82) «Ободья колес для большегрузных автомобилей, строительно-дорожных и подъемно-транспортных машин».

Гарантийный срок эксплуатации ободьев, по этому стандарту, установлен 24 месяца, при пробеге не более 30 000 км и наработке не более 30 000 моточасов.

Для изготовления наиболее ответственных деталей–основания обода и кольца бортового используются стали марок типа 09Г2С (аналог - сталь 12 Mn), 17Г1С (аналог - сталь 16 Mn), Q 345 B, Q 345 D, Q 345 E (аналогов не имеется). Для изготовления посадочного кольца используется сталь 15, для замочного кольца – сталь 35.Требования к сварке должны соответствовать стандарту AS 1554.5 «Welding of Steel structures», по которому оговорены требования к структуре и механическим свойствам сварных швов.



а) со сварным швом,



б) без сварного шва

Рисунок 2 – Образец для проведения испытаний:

Технологии производства сварного основания обода колес включает такие операции как профильная раскатка, токарная обработка под сварку, электродуговая сварка под флюсом, ультразвуковая дефектоскопия, магнитопорошковая дефектоскопия,. дробеструйная обработка.

Белорусский автомобильный завод имеет намерение использовать кольцераскатку для производства обода колес с цельным основанием обода без использования процессов сварки. Для решения этой проблемы необходима не только закупка современного оборудования, но и разработка технологии кольцераскатки для выбора оптимального соотношения геометрических параметров и технологических режимов на всех стадиях получения кольцевой заготовки для различных марок сталей и соотношения размеров по диаметру и высоте кольца.

Усталостные испытания сварных и цельных элементов обода при циклическом нагружении.

В качестве объекта испытаний приняты образцы по типу IV по ГОСТ 25.502-79, вырезанные из основания обода со сварным швом без сварного шва в рабочей части образца (рис. 2)

Коэффициент асимметрии цикла нагружения был принят равным нулю.

За базовое число циклов принимается $2x10^6$.Испытания проводились при фиксированной нагрузке (мягкое нагружение).

По результатам испытаний образцов со сварным швом и без сварного шва были вычислены параметры кривой усталости и предела выносливости. с учетом требований ГОСТ 25.502-79 [11]. На рисунке 3 представлены кривые усталости по результатам испытания образцов без сварного шва и со сварным швом.

Итоговые результаты испытания сварных и цельных элементов обода при циклическом нагружении приведены в таблице 1.

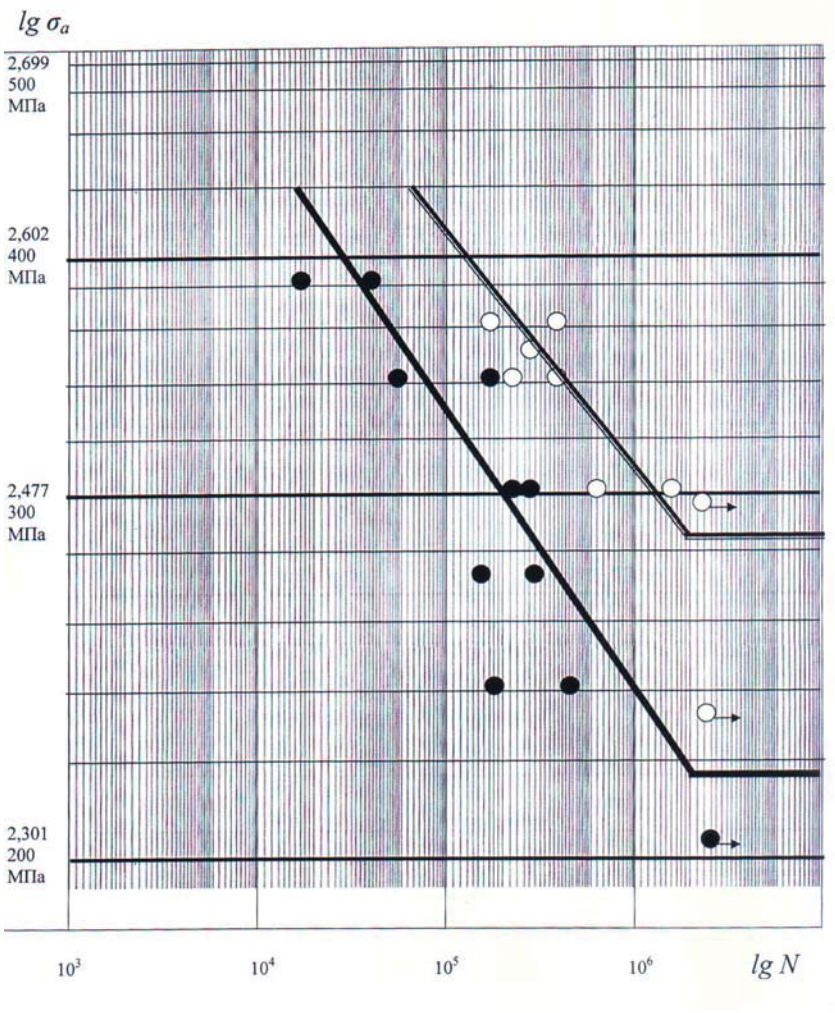
На рис. 4 показана схема установки обода на ступице колеса, приведенная схема использовались в дальнейших расчетах при определении схемы нагружения основания обода.

Для определения ресурса ободьев сварной и цельной конструкции поэтапно были выполнены расчеты уровней статического и циклического нагружения в местах расположения сварных швов №1 и №2 от действия:

- давления в шине q,- растягивающего усилия от давления в шине F,
- крутящего момента M_k,- статической радиальной нагрузки на колесо P_1 и P_2,
- боковой силы вследствие N приложения тяговой силы,- циклической радиальной и тангенциальной нагрузки на колесо.

Для определения эквивалентных напряжений с учетом коэффициента максимальной нагрузки на колесо были приняты предпосылки:

- величина максимально крутящего момента остается неизменной,- величина давления в шине увеличена до 2,4 МПа,- величина максимальной нагрузки на колесо увеличивается в 2,5 раза по сравнению с номинальной 63 000 кГ,- на обод колеса действует не только радиальное усилие, но и осевое (боковое) усилие от наклона оси самосвала, которое приводит к изменению соотношения усилий Р1 к Р2 в соотношении 2:1.



○ - без сварного шва, ● - со сварным швом

Рисунок 3 – Кривые усталости по результатам испытания образцов:

Таблица 1 – Результаты определения предела выносливости при симметричном цикле нагружения по результатам усталостных испытаний на растяжение на элементах основания обода

Тип образца	Предел прочности σ_b, МПа	Предел выносливости при асимметричном цикле σ_0, МПа	Амплитуда колебаний при асимметричном цикле σ_{0a}, МПа	Среднее напряжение при асимметричном цикле σ_{0m}, МПа	Предел выносливости при симметричном цикле нагружения σ_{-1}, МПа	Показатель кривой усталости, m
Со сварным швом	500	218	109	109	114	8,47
Без сварного шва	500	288	144	144	157	10,76

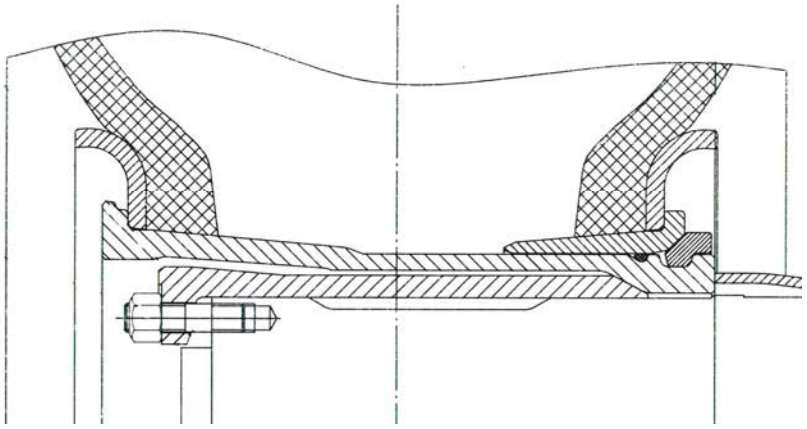


Рисунок 4 – Схема установки обода на ступице

В качестве расчетных режимов нагружения основания обода приняты два режима:

- первый режим – движение с нагрузкой с максимальными эквивалентными напряжениями 103,8 МПа и минимальными эквивалентными напряжения 27,4 МПа, длительность первого режима 1/2 от длительности общего движения;

- второй режим - движение без нагрузки с максимальными эквивалентными напряжениями 44,5 МПа и минимальными эквивалентными напряжения 27,4 МПа, длительность второго режима составляет 1/2 от длительности общего движения.

С учетом принятых режимов нагружения основания обода и усталостных свойств сварного и цельного основания обода на основе гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений при расчете ресурса на 100 000 км пробега для варианта сварного основания обода

$$K_{îá} = \frac{\Sigma\sigma_{i-1}^{m} \cdot n_i}{\left[\sigma_{-1}^{m}\right] \cdot N_0} = \frac{0{,}13 \cdot 10^{21}}{0{,}39 \cdot 10^{21}} = 0{,}33$$

,

что позволяет гарантировать ресурс на 100 000 км пробега для варианта сварного основания обода.

Исходя из показателя $K_{îá} = 0{,}33$ при ресурсе пробега на 100 000 км максимально возможный пробег для варианта сварного основания обода составит не более 300 000 км.

При расчете ресурса на 1000 000 км пробега для варианта цельного основания обода

$$K_{îá} = \frac{\Sigma\sigma_{i-1}^{m} \cdot n_i}{\left[\sigma_{-1}^{m}\right] \cdot N_0} = \frac{0{,}13 \cdot 10^{22}}{0{,}38 \cdot 10^{29}} = 0{,}34 \cdot 10^{-7}$$

,

что позволяет гарантировать ресурс на 1000 000 км пробега для варианта цельного основания обода.

Полученные расчетные показатели ресурса для сварного основания обода полностью совпали с результатами проведенных опросов ходимости колес:

- Кузбассавто – ободья производства Keimax – 250 – 300 тыс. км,

- ЗАО «Прокопьевский угольный разрез» – ободья производства Keimax – без разрушения 173 тыс. км,

- ЗАО «Разрез Распадский» – ободья производства Keimax – от 120 до 320 тыс. км,

- ЗАО «САЛЕК» - 170 -200 тыс.км

- Разрез «Виноградовский» – ободья производства Keimax – 199 -268 тыс. км,

- Мечел, Якутуголь – ободья производства Keimax – 173 тыс. км,

- Разрез «Киселевский» – ободья производства Keimax – 312 тыс. км.

Расчет ресурса на основании результатов по исследованию усталостных свойств элементов сварного и цельного основания обода, полученных в результате натурных исследований, позволяет сделать выводы о том, что

- для варианта сварного основания обода обеспечивается расчетный ресурс пробега 100 000 км, максимально возможный пробег находится в пределах 300 000 км.

- для варианта цельного основания обода обеспечивается расчетный ресурс пробега 1 000 000 км.

Технология изготовления цельного основания обода.

В связи с этим представляется более целесообразным изготавливать цельный обод, менее зависящий от выполнения ряда требований по обеспечению качества сварного шва и снятия внутренних напряжений и обеспечивающий значительное повышение ресурса.

Однако требуемое повышение прочности и ресурса цельного обода может быть достигнуто только при соответствующей отработке режимов кольцераскатки. Отработка режимов кольцераскатки для повышения прочностных свойств связана с уточнением геометрических параметров колец, обеспечивающих оптимальные условия пластического деформирования колец на всех этапах их изготовления. В отработку режимов кольцераскатки входит также

уточнение свойств материала при многократном пластическом деформировании.

Отношение толщины стенки основания обода к его диаметру составляет 0,011 – 0,018, в то время как изготавливаемые с использованием кольцераскатки детали типа гильз имеют это отношение в пределах 0,04 – 0,12. Условия течения материала при раскатке колец с относительной тонкой стенкой значительно отличаются от условий кольцераскатки при изготовлении аналогичных деталей типа гильз и непрофильных колец с прямоугольным сечением и относительной толщиной стенки выше 0,12. Анализ мирового опыта использования кольцераскатки выявил отсутствие технологии раскатки колец с несимметричным профилем и отношением толщины стенки к диаметру кольца в пределах 0,015, которые используются в элементах обода колес карьерных самосвалов.

Современные кольцераскатные комплексы являются сложнейшими производственными системами, включающими процессы резки, нагрева, деформирования с системами адаптивного управления и контроля, которые позволяют непрерывно контролировать и корректировать процесс кольцераскатки с учетом свойств каждого конкретного кольца. В результате достигается высокая окончательная точность кольца и улучшаются физико-механические свойства материала.

Схема кольцераскатки имеет особенность, которая заключается в том, что основное изменение заготовки в процессе кольцераскатки происходит в радиальном направлении и незначительное - в осевом (рис. 5).

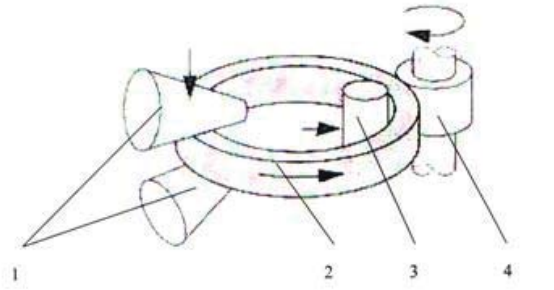


Рисунок 5 – Направления изменения параметров заготовки в процессе кольцераскатки

Эта особенность кольцераскатки приводит к тому, что исходную заготовку на прессе под последующую кольцераскатку нужно создать с высотой заготовки, максимально приближенной к окончательной высоте раскатанного кольца

Так как максимальная высота основания обода достигает 900 – 1000 мм, то и высота заготовки после пресса под последующую кольцераскатку должна быть не менее 850 - 950 мм. Получить такую заготовку можно с использованием 3-х позиционного пресса и процесса так называемого обратного выдавливания. На рис. 6 представлена схема формирования заготовки на прессе под кольцераскатку на 3-ей окончательной позиции.

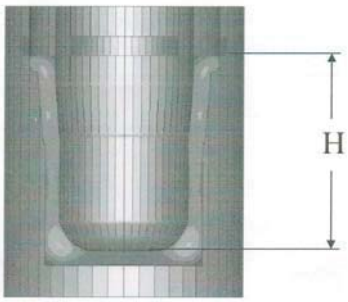


Рисунок 6 – Схема формирования заготовки на прессе под кольцераскатку на 3-ей окончательной позиции

В таблице 2 приведены значения параметров основания обода для сварной и цельной конструкции основания обода, достигаемые при использовании известных операций прессования и кольцераскатки.

Выполненные расчеты технологических параметров изготовления обода показали, что для получения основания обода цельной конструкции требуется формирование на прессе заготовки с:

- высотой не менее $h = 0{,}95H$ от окончательной высоты;
- наружным диаметром не менее $d = 0{,}45D$ от окончательного наружного диаметра;
- толщиной стенки не менее $b = (2{,}5...2{,}6)B$ от окончательной толщины стенки;

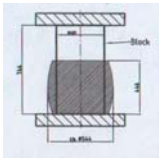
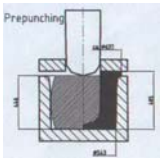
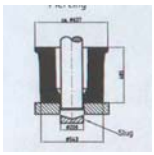
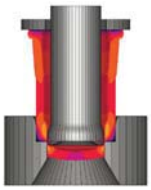
и на операции кольцераскатки обеспечивается изготовление основания обода с:

- высотой $h = 1{,}0H$ от окончательной высоты,
- наружным диаметром $d = 1{,}0D$ от окончательного наружного диаметра,
- толщиной стенки $b = (1{,}20...1{,}25)B$ от окончательной толщины стенки.

Выполненные расчеты силовых параметров изготовления обода колес тяжелых карьерных самосвалов в пределах грузоподъемности до 360 тонн показали, что для изготовления основания обода цельной конструкции требуется использование пресса с 3-х позиционным подвижным столом, усилием не менее 100 МН (10.000 тонн) и кольцераскатной установки с радиальным усилием не менее 3,5…4,0 МН (350 … 400 тонн) и осевым усилием не менее 2,0…2,5 МН (200 … 250 тонн).

Проведенный анализ по оптимизации загрузки кольцераскатного комплекса, повышению коэффициента использования материала и снижения энергозатрат показали преимущества использования кольцераскатного комплекса с возможностями изготовления цельного основания обода [4-7] .

Таблица 2 - Соотношения параметров основания обода на операциях прессования и кольцераскатки для сварной и цельной конструкции основания обода

Конструкция основания обода	Пресс 1-я позиция	Пресс 2-я позиция	Пресс 3-я позиция	Параметры заготовки после пресса	Параметры заготовки после кольцераскатки
Сварная				Диаметр наружный $d = (0{,}4...0{,}5)D$	Диаметр наружный $d = 1{,}0D$
				Высота $h = (0{,}5...0{,}6)H$	Высота $h = (0{,}5...0{,}6)H$
				Толщина стенки $b = (5...6)B$	Толщина стенки $b = (2{,}35...2{,}50)B$
Цельная				Диаметр наружный $d = 0{,}45D$	Диаметр наружный $d = 1{,}0D$
				Высота $h = 0{,}95H$	Высота $h = 1{,}0H$
				Толщина стенки $b = (2{,}5...2{,}6)B$	Толщина стенки $b = (1{,}20...1{,}25)B$

Реализация настоящего проекта позволит создать уникальное современное стратегическое кольцераскатное производство, не имеющее аналогов на территории Беларуси, что позволит решить проблему зависимости от импорта ободьев карьерных самосвалов и ориентировать на поставку части кольцераскатной продукции на экспорт в Россию и другие страны для нужд атомной энергетики, космической, оборонной, нефтяной, газовой и химической промышленности, что значительно повышает значимость такого комплекса для Белоруссии.

Выводы

1. Белорусский автомобильный завод в течение последних 5-ти лет основательно изучил возможности изготовления цельного обода и пришел к выводу об экономической целесообразности изготовления цельного основания обода без использования сварки.

2. На первом этапе изготовления цельного основания обода с использованием кольцераскатки возможно увеличение цены обода, так как такой технологии пока в мировой практике не существует.

3. По мере освоения изготовления цельного основания обода будет совершенствоваться технология и режимы кольцераскатки и соответственно снижаться стоимость изготовления основания обода при сохранении неизменным увеличенного ресурса по пробегу до 1 млн. км.

Список литературы

1. ГОСТ 26147-84 (СТ СЭВ 3732-82). Ободья колес для большегрузных автомобилей, строительно-дорожных и подъемно-транспортных машин. – М.: Издательство стандартов. – 1984. – 5 с.

2. ГОСТ Р52390-2005. Транспортные средства. Колеса дисковые. Технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ. – 2006. – 28с.

3.Антонюк, В.Е. Кольцераскатка в производстве деталей машиностроения / В.Е.Антонюк, П.А.Витязь, П. А. Пархомчик, В.В.Рудый, А.А.Шипко А. А. Минск: Беларус. навука, 2013, – 189 с.

JUSTIFICATION OF CHOICE OF THE TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR THE PRODUCTION OF WHEEL RIMS FOR MINING DUMP TRUCKS WITH THE PAYLOAD CAPACITY OF 90-450 TONS

Rudy V.V.

OJSC «BELAZ» - Management Company of Holding «BELAZ-HOLDING»,
40 let Octyabrya str. 4, 222161, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus
e-mail - viktor.rudy@gmail.com

Аннотация: The distinctive features of engineering and power parameters of the ring-rolling technology of production of wheel rim bases have been considered. Design and engineering requirements for wheel rim parts with the use of ring-rolling technology have been analyzed. Rim base design allows the use of welding. The comparative analysis of strength properties and service life of welded and weldless rims has shown that in case of welded rim base the maximum possible kilometrage is up to 300 000 km and in case of weldless rim base the maximum possible kilometrage is up to 1 000 000 km.

Ключевые слова: ring-rolling production, wheel rim, mining dump truck

УДК 620.179.14

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УПРОЧНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Н. В. АБАБКОВ, канд. техн. наук,
Е. Е. ПЕТРОВА, магистр техники и технологии
(КузГТУ, г. Кемерово)

650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
e-mail: n.ababkov@rambler.ru

Аннотация: В статье выявлены основные направления в контроле физико-механических характеристик упрочненных слоев металлических изделий: разрушающее и неразрушающее. Показано, что акустические методы неразрушающего контроля могут быть применены для контроля упрочненного слоя металлических изделий. В работе были исследованы образцы металла с упрочненным поверхностным слоем, полученным методом детонационного напыления. Установлено, что для образцов металла с покрытиями характерно увеличение средних значений времени задержки поверхностных акустических волн.

Ключевые слова: спектрально-акустический метод контроля, упрочненный поверхностный слой, металлические изделия, детонационное напыление.

Актуальной задачей современного машиностроения является обеспечение долговечности деталей машин, которая в существенной мере определяется качеством поверхностного слоя [1]. Важными являются вопросы повышения надежности приборов, установок, повышение их качества и эффективности работы, а, следовательно, вопросы экономии металлов, борьбы с коррозией и износом деталей машин [1]. Особенно это важно в настоящее время, так как развитие большинства отраслей промышленности (авиационная, ракетная, теплоэнергетика, атомная энергетика, радиоэлектроника и др.) связано с повышением нагрузок, температур, агрессивности сред, в которых работает деталь [1].

Решение этих задач, прежде всего, связано с упрочнением поверхностных слоев металлических изделий. Изменять свойства поверхностного слоя можно различными способами: нанесением на поверхность нового материала с необходимыми свойствами; изменением структуры поверхностного слоя металла; термической, химической и механической обработками поверхности и другими способами [1-3].

Поскольку необходимый комплекс эксплуатационных характеристик и ресурс изделий закладывается на стадии их производства, то чрезвычайно важным является контроль качества исходных материалов и определения глубины упрочненного слоя. Именно контроль механических свойств на стадии изготовления должен являться первоочередным в реализации комплексной программы диагностики объектов в процессе их эксплуатации, так как только в этом случае можно зафиксировать тенденцию изменения тех параметров, от которых зависит остаточный ресурс.

В настоящее время известны два основных направления в контроле физико-механических характеристик металлических изделий: разрушающее [4] и неразрушающее [5, 6].

При определении физико-механических характеристик материала с помощью разрушающего контроля необходимо строго выполнять условия проведения испытаний, которые изложены в стандартах или в других нормативных документах. При отклонении от принятых условий испытаний неизбежны погрешности. Недостатком данного контроля является то, что это длительный процесс, который приводит к разрушению испытуемого образца. Неразрушающий контроль устраняет данные недостатки, поэтому неразрушающий контроль и диагностика являются приоритетными направлениями в задачах обеспечения контроля физико-механических свойств упрочненных слоев металлических изделий [1].

Методы неразрушающего контроля, применяемые в настоящее время, используются в основном для обнаружения существующих дефектов и не позволяют, в необходимой мере, определять степень изменения структуры основного и наплавленного металла в процессе длительной эксплуатации. В этом отношении перспективны акустические методы. Измеряемые характеристики, такие как время и скорость задержки поверхностных акустических волн и, чувствительны к изменениям структуры металла и зарождению

микроповреждений, а также имеют связь с механическими свойствами материалов [5].

Измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН» предназначен для оценки физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния материала ответственных элементов различных технических объектов [8].

В основу работы аппаратной части системы положен способ подробной регистрации всей серии отраженных акустических импульсов для ее последующей обработки средствами программной части системы. Для передачи первичной акустической информации в обрабатывающую часть системы производится последовательное преобразование осциллограммы отраженных импульсов с определенным шагом дискретизации с момента зондирования исследуемого материала и до прихода *n*-го отраженного импульса. С комплексом «АСТРОН» широко используются преобразователи поверхностных волн, представляющие собой выполненные в одном корпусе излучатель и приемник (рис. 1).

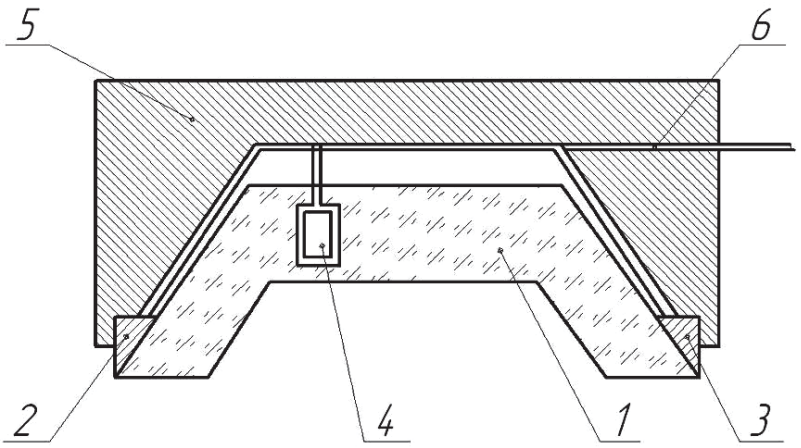


Рисунок 1 – Малобазный релеевский датчик:
1 – двусторонний клин из оргстекла; *2* – излучатель релеевских волн;
3 – приемник релеевских волн; *4* – излучатель-приемник термоимпульсов;
5 – корпус; *6* – высокочастотный кабель

Датчик состоит из двустороннего клина из оргстекла *1* с углом ввода ультразвука 27° (для объектов контроля из стали), излучателя *2* и приемника *3* релеевских волн с центральной частотой 5 МГц. База (расстояние между поверхностями излучения и приема) может варьироваться в широких пределах в зависимости от геометрических размеров зон измерения.

Таким образом, для определения характеристик поверхностей, микроструктуры и механических свойств упрочненных слоев металлических изделий целесообразно использовать неразрушающий контроль, который к настоящему времени превращается в самостоятельную отрасль промышленности, решающую задачи обследования и создания аппаратуры, методик контроля, проведения научных исследований, сертификации, стандартизации и обучения [1].

В настоящей работе были исследованы образцы металла с упрочненным поверхностным слоем, полученным методом детонационного напыления [7].

Материал подложки – сталь 20. Образцы размерами 60×40×10 были получены способом детонационного напыления. Нанесенные покрытия состоят из смесей порошков Al_2O_3 и ПР-БрАЖ9-4-3 (фракция 20–40 мкм) в массовом соотношении 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5 каждого слоя. Режимы напыления представлены в работе [7].

Результаты исследований спектрально-акустическим методом образцов металла с упрочненным поверхностным слоем, полученным методом детонационного напыления, представлены на рис. 2.

Как видно из гистограммы (рис. 2), минимальные значения времени задержки поверхности акустических волн (R) соответствуют образцу без нанесенного покрытия – металлу подложки, и составляют 4712 нс. Для образцов с покрытиями значения R значительно больше, чем для металла подложки, до 4791 нс для образца с 50 %-тным содержанием порошка Al_2O_3. Это объясняется значительной неоднородностью материала полученного покрытия и наличием пор, обнаруженных на поверхности покрытий ранее [8].

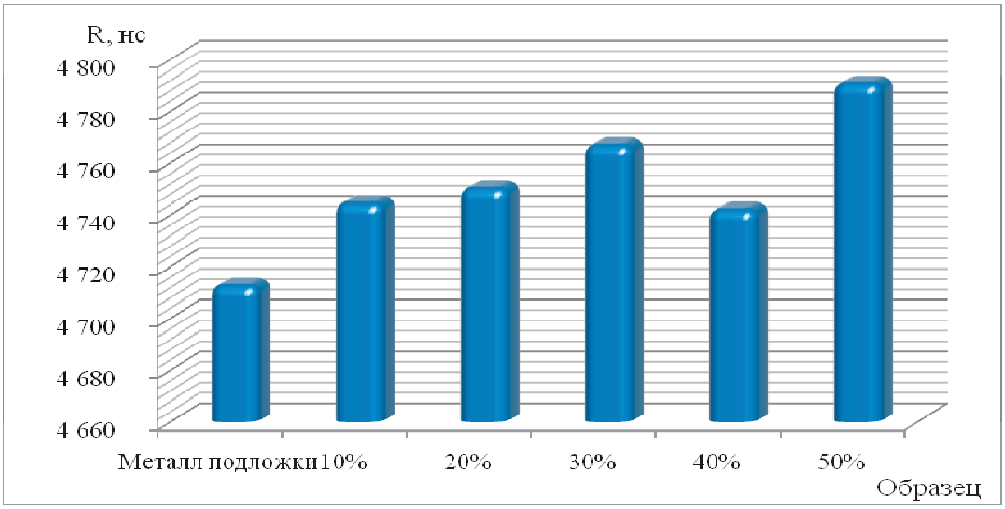


Рисунок 2 – Гистограмма средних значений времени задержки поверхности акустических волн для исследованных образцов

Таким образом, спектрально-акустический метод контроль может применяться для оценки качества упрочненных слоев металлических изделий.

Выводы

1. Проведен анализ существующих направлениq в контроле физико-механических характеристик упрочненных слоев металлических изделий/ Показано, что акустические методы неразрушающего контроля могут быть применены для контроля упрочненного слоя металлических изделий.

2. Спектрально-акустическим методом исследованы образцы металла с упрочненным поверхностным слоем, полученным методом детонационного напыления. Установлено, что для образцов металла с покрытиями характерно увеличение средних значений времени задержки поверхностных акустических волн с 4712 нс для металла подложки до 4791 нс для образца с 50 %-тным содержанием порошка Al_2O_3. Это объясняется значительной неоднородностью материала полученного покрытия и наличием пор, обнаруженных на поверхности покрытий ранее.

Список литературы

1. *Горкунов, Б. М.* Анализ методов и устройств для контроля упрочненного слоя металлических изделий / Горкунов Б. М., Тищенко А. А. // Сборник научных трудов «Вестник НТУ "ХПИ»: Електроенергетика та перетворювальна техніка, №12 – Вестник НТУ «ХПИ», 2010. – С. 128–135.

2. *Смелянский, В. М.* концепция инженерии поверхностного слоя в категориях пластичности и технологического наследования / В. М. Смелянский, В. Ю. Блюменштейн // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2001. – № 4. – С. 17.

3. *Иванов, Ю. Ф.* Модификация поверхностного слоя стали при электронно-лучевой обработке / Ю. Ф. Иванов, Ю. А. Колубаева, С. В. Коновалов и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – № 12. – С. 10–16.

4. *Коновалов, Д. А.* Определение кривых деформационного упрочнения металлов по результатам вдавливания конических инденторов / Д. А. Коновалов, С. В. Смирнов, А. В. Коновалов // Дефектоскопия. – 2008. – № 12. – С. 55–63.

5. *Смирнов, А. Н.* Градиентные структуры при обработке металлов резанием / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Э. В. Козлов и др. – Кемерово: ООО «Сибирская издательская группа», 2013. – 179 с.

6. *Смирнов, А. Н.* Критерии оценки состояния и ресурса длительно работающих барабанов котлов высокого давления / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков // Сварка и диагностика. – 2013. – № 4. – С. 55–58.

7. *Смирнов, А. Н.* Экспертиза промышленной безопасности в Сибирском регионе. – М.: Машиностроение, 2015. – С. 192–198.

8. *Фольмер С.* В. Разработка технологии оценки ресурса сварных соединений трубопроводов с применением спектрально-акустического метода / автореф. на соиск. степ. канд. техн. наук. – Барнаул, 2009. – 19 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ, соглашение № 14-19-00724.

THE APPLICATION OF SPECTRAL-ACOUSTIC METHOD OF CONTROL FOR HARDENED SURFACE LAYER OF METAL PRODUCTS

Ababkov N. V., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: n.ababkov@rambler.ru,
Petrova E. E., M.Sc. (Engineering), e-mail: petrova-lena-petrova2010@ya.ru

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

Abstract: The paper identified the main directions in the control of physical and mechanical properties of hardened layers of metal products: destructive and non-destructive. It is shown that the acoustic NDT methods can be used for control of metal products hardened layer. The samples were tested with the metal hardened surface layer obtained by detonation spraying in the paper. It is found that the coated metal specimens increase in the average characteristic values of delay time of the surface acoustic waves.

Keywords: spectral-acoustic method of control, hardened surface layer, metal products, detonation spraying.

УДК 620.179.14

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАНОРАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ПО ПАРАМЕТРАМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

Н. В. АБАБКОВ, канд. техн. наук,
А. Н. СМИРНОВ, доктор техн. наук, профессор,
Н. В. БЫКОВА, аспирант
(КузГТУ, г. Кемерово)

650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
e-mail: n.ababkov@rambler.ru

Аннотация: В работе проведено исследование поверхности излома разрушенного ротора паровой турбины методом акустической структуроскопии. Изучено структурно-фазовое состояние металла разрушенного ротора паровой турбины с помощью методов электронной микроскопии. Установлено, что на участках контроля, где значения акустических характеристик имели значительные отличия от всего остального металла обнаружена нанокристаллическая структура. Показана возможность определения наноразмерной структуры металла с помощью акустической структуроскопии.

Ключевые слова: наноразмерная структура, метод акустической структуроскопии, структурно-фазовый состав, ротор паровой турбины, электронная микроскопия.

Аварийное разрушение ротора паровой турбины №2 ПВС ОАО «ЗСМК» произошло после 194 тыс. часов эксплуатации в перпендикулярном, относительно продольной оси ротора сечении, переходном от диаметра 295 мм (15 ступень) к диаметру 280 мм (16 ступень). Фокусом излома явился концентратор напряжений в зоне шпоночного паза 15 ступени ротора (рис. 1).



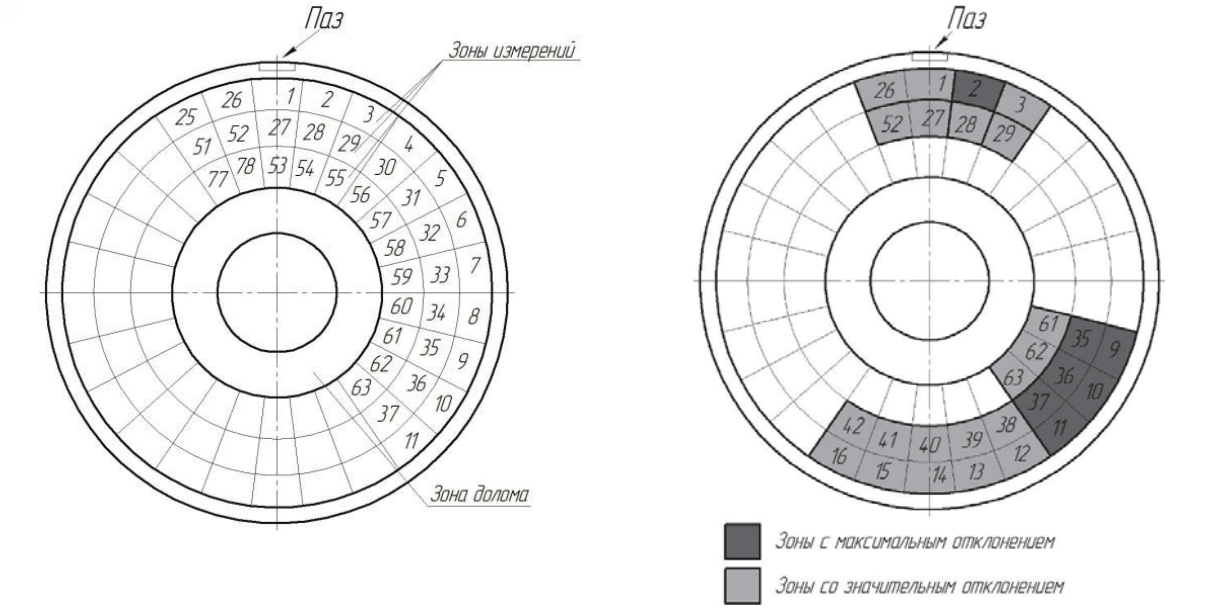
Рисунок 1 – Общий вид поверхности излома ротора

Вид поверхностей излома свидетельствует об усталостном характере разрушения. Турбина типа ВКВ-22-90 изготовлена на Невском машиностроительном заводе им. В.И. Ленина в 1963 г. [1].

Для проведения исследования из разрушенного ротора был отрезан диск (образец) параллельно поверхности излома толщиной ~50 мм. Места вырезки шлифов из диска определяли акустическими методами, включая спектрально-акустический (релеевскими волнами сканированием поверхности противоположной излому), и с торца диска продольными волнами по всей окружности [1].

Поверхность образца для исследования спектрально-акустическим методом (ИВК «Астрон») [2, 3] разбивали на зоны в виде прямоугольников (рис. 2. *а*).

После проведения измерения была получена следующая картина распределения акустических и магнитных характеристик относительно сечения ротора. Наибольшие значения отклонений измеренных характеристик выявлены в зонах сканирования 2, 9–11 и 35–37. Также значительные отклонения от средней величины обнаружены в зонах 1, 3, 12–16, 26–29, 38–42, 52 и 61–63 (рис. 2, *б*) [4, 5].



а) *б)*

Рисунок 2 – Схема и результаты измерения акустических и магнитных характеристик по поверхности излома исследуемого образца:
а – схема измерения; *б* – результаты измерений

Далее были выбраны четыре участка с акустическими характеристиками, значительно отличающимися, от всего остального металла диска (образца). Металлофизические исследования проведены в пяти различных участках этого образца на поверхности противоположной излому и на расстоянии 0,5 мм от излома. Схематически положение этих участков относительно поверхности излома приведено на рис. 3 [1].

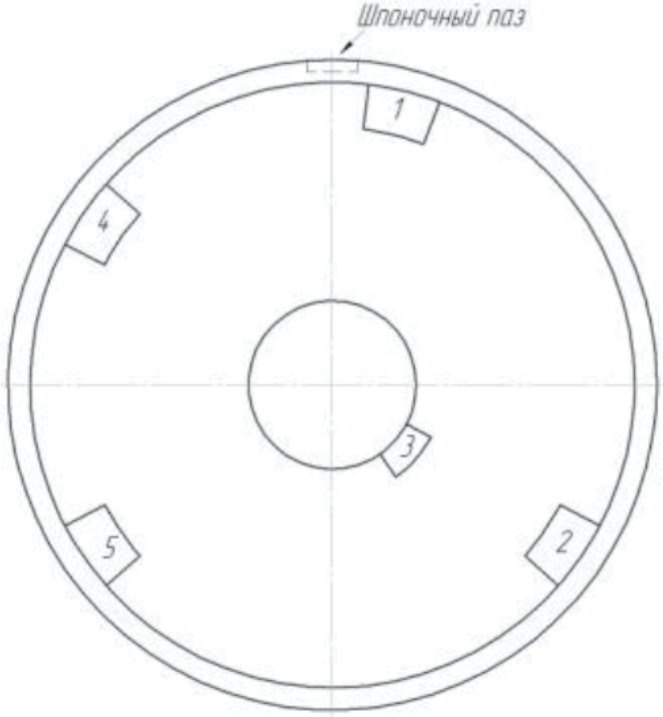


Рисунок 3 –. Схема мест вырезки образцов для исследования

Установлено, что по химическому составу металла ротор паровой турбины изготовлен из стали 40Х2Н2МА (ГОСТ 4543-71). Анализ проведен на оптико-эмиссионном спектрометре «Q4 Tasman» [1].

В работе применяли рентгеноструктурный анализ (РСА) и просвечивающую дифракцион-

ную электронную микроскопию на тонких фольгах (ПЭМ). Исследования с использованием рентгеноструктурного анализа проводили при комнатной температуре на дифрактометре ДРОН-7 [6]. Электронно-микроскопические исследования проведены на просвечивающем электронном микроскопе ЭМ-125 (без гониометра), настроенном на высокое разрешение, при ускоряющем напряжении 125 кВ. Рабочее увеличение в колонне микроскопа составляло ×25 000. Определение размеров и объемной доли присутствующих в материале фаз проводили по изображениям, подтвержденным микродифракционными картинами и темнопольными изображениями, полученными в рефлексах соответствующих фаз [7].

Как показали проведенные исследования, основой всех исследуемых образцов является α-фаза. Её объемная доля в любой точке изделия составляет не менее 95%. α-фаза – это твердый раствор одновременно элементов внедрения (C, N и др.) и замещения (Mn, Cr, Si и др.) в α-Fe с ОЦК кристаллической решеткой. Основные узлы занимают, прежде всего, атомы железа, а также элементы замещения, междоузлия (в основном это тетраэдрические междоузлия) частично заняты атомами углерода. Рентгеновские дифракционные картины, полученные со всех образцов, идентичны.

Параметры кристаллических решеток α-фазы во всех точках исследованных образцов приведены в табл. В этой же таблице приведены фазовый состав, микроискажения и размеры областей когерентного рассеяния (ОКР), полученные методом рентгеноструктурного анализа (РСА). Как видно из табл. 1, в любой точке изделия параметр кристаллической решетки равен 0,2872±0,0002 нм, т.е. несколько выше, чем параметр кристаллической решетки чистого α-Fe. Параметр кристаллической решетки α-Fe равен 0,2866 нм. Это означает, что α-фаза хотя и состоит, в основном, из α-Fe, однако в твердом растворе кроме элементов замещения (Mn, Cr, Ni, Mo, Si) также находится и элемент внедрения – углерод.

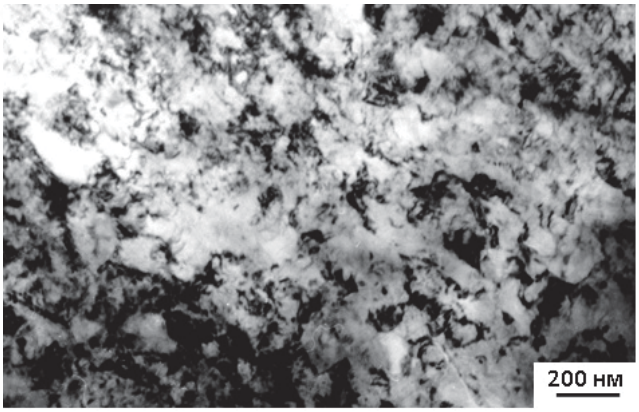
Таблица – Данные рентгеноструктурного анализа

Номер образца		Фазовый состав	Параметр кристаллической решетки α-Fe, *a*, нм	Микроискажения, Δd/d	Размер ОКР, нм
№ 3		α-Fe	$0,2870_5$	0,0005	50
№ 1	№ 1-1	α-Fe	$0,2870_0$	0,0022	>100
	№ 1-2	α-Fe	$0,2870_7$	0,0014	56
№ 2	№ 2-1	α-Fe	$0,2872_0$	0,0018	>100
	№ 2-2	α-Fe	$0,2871_0$	0,0010	75
№ 4	№ 4-1	α-Fe	$0,2870_0$	0,0020	>100
	№ 4-2	α-Fe	$0,2870_0$	0,0010	92,5
№ 5	№ 5-1	α-Fe	$0,2873_4$	0,0010	90
	№ 5-2	α-Fe	$0,287_5$	0,0005	50

Электронно-микроскопические исследования показали, что независимо от места исследования основной фазовой составляющей (матрицей) исследуемой стали является α-фаза. Морфологически α-фаза в различных образцах в общем случае присутствует в виде: 1) бейнита (наименее дефектная часть материала); 2) фрагментированной α-фазы с анизотропными фрагментами; 3) фрагментированной α-фазы с изотропными фрагментами и 4) нанокристаллической структуры.

Нанокристаллическая структура присутствует не во всех исследованных точках изделия. Микродифракционная картина – кольцевая. Пример электронно-микроскопического изображения и его микродифракционной картины приведен на рис. 4.

Так как электронно-микроскопическому исследованию подлежали только те участки, у которых значения акустических характеристик значительно отличаются от всего остального металла диска, то по результатам исследований можно заключить, что по параметрам акустической структуроскопии можно судить о наличии наноразмерной структуры в металле.



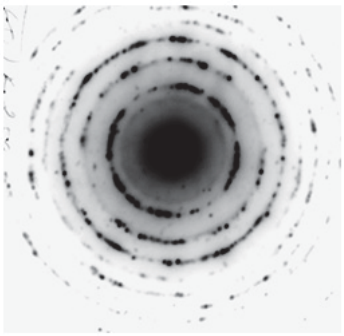


Рисунок. 4 – Электронно-микроскопическое изображение нанокристаллической структуры

Список литературы

1. *Быкова, Н. В.* Исследование структурно-фазового состояния металла разрушенного ротора паровой турбины высокого давления / Н. В. Быкова, Н. В. Абабков // Перспективы фундаментальных наук [Электронный ресурс] : сб. тр. XII Международной конференция студентов и молодых ученых / ТПУ – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 1227–1229.

2. *Митенков, Ф.М.* О новом методе контроля повреждаемости материала оборудования ЯЭУ и аппаратно-программных средствах для ее реализации / Митенков Ф.М., Углов А.Л., Пичков С.Н., Попцов В.М. // Проблемы машиноведения и надежности машин, 1998. – №3. – С.3–9.

3. *Абабков, Н. В.* Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 2. Спектрально-акустический метод контроля / Н. В. Абабков, А. В. Бенедиктов, А. Н. Смирнов и др. // Вестн. КузГТУ. 2010. – № 5. – С. 101–106.

4. *Смирнов, А. Н.* Установление корреляционных зависимостей между акустическими и магнитными характеристиками металла разрушенного ротора паровой турбины и результатами электронной микроскопии / А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков, Н.В. Быкова // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. тр. V МНПК: в 2-х т. / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. Т.1. – С. 100-104.

5. *Смирнов, А. Н.* Микроструктура, поля внутренних напряжений и акустические характеристики металла разрушенного ротора паровой турбины / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Э. В. Козлов и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57. № 10. – С. 67–71.

6. *Смирнов, А. Н.* Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 1. Микроскопия и рентгеноструктурный анализ / А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов, Н. В. Абабков и др. // Вестн. КузГТУ. 2010. – №4. – С.62–68.

7. *Иванов, Ю. Ф.* Градиентные структурно-фазовые состояния, формирующиеся в стали 08Х18Н10Т при многоцикловой усталости до разрушения / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, С.В. Горбунов и др. // Физика металлов и металловедение. – 2011. – Т. 112. – № 1. – С. 85–93.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ, соглашение № 14-19-00724.

IDENTIFICATION OF NANOSCALE STRUCTURES ACCORDING TO A PARAMETERS OF ACOUSTIC STRUCTUROSCOPY METHOD

Ababkov N. V., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: n.ababkov@rambler.ru,
Smirnov A. N., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: galvas.kem@gmail.com,
Bykova N. V., post graduated student (Engineering), e-mail: natalie.vrb91@mail.ru

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

Abstract: The fracture surface of a destroyed steam turbine rotor is studied by acoustic structuroscopy. The structural-phase state of the metal of the destroyed rotor of a steam turbine is studied using the methods of electron microscopy. It was established that in the areas of control, where the values of the acoustic characteristics have significant differences from the rest of the metal, detected nanocrystalline structure. The possibility of determining the structure of the nanoscale metal by acoustic structuroscopy is shown.

Keywords: nanoscale structure, method of acoustic structuroscopy structurally-phase composition, the rotor of a steam turbine, electron microscopy.

УДК 620.179.14

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛА ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ И ПОВРЕЖДЕННЫХ ГИБОВ ПАРООТВОДЯЩИХ ТРУБ АКУСТИЧЕСКИМИ И МАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ

Н. В. АБАБКОВ, канд. техн. наук,
А. Н. СМИРНОВ, доктор техн. наук, профессор,
А. А. ЗАВСЕГОЛОВ, магистрант
(КузГТУ, г. Кемерово)

650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
e-mail: n.ababkov@rambler.ru

Аннотация: В работе проведено исследование металла эксплуатируемых и поврежденных гибов пароотводящих труб акустическими и магнитными методами. В частности, исследован образец не имеющий повреждений, образец с коррозионно-усталостной трещиной и образец с технологическим дефектом типа заката. Все образцы изготовлены из стали 20, но имеют разную наработку. Построены графические зависимости акустических и магнитных характеристик от времени наработки. Установлены значения акустических и магнитных характеристик, соответствующие дефектному состоянию для гибов пароотводящих труб, изготовленных из стали 20.

Ключевые слова: гибы пароотводящих труб, спектрально-акустический метод, коэрцитивная сила, исследование металла.

В процессе эксплуатации элементов технических устройств опасных производственных объектов (ТУОПО) энергетической промышленности возникает целый ряд проблем, которые могут привести к техногенным катастрофам и человеческим жертвам. В первую очередь, это связано с тем, что большая часть оборудования (85–90%) выработала свой ресурс и нуждается в полной или частичной замене. Однако, современное состояние экономики в теплоэнергетической промышленности не позволяет достичь поставленных целей. Поэтому весьма актуальным становится вопрос разработки новых, эффективных технологий, методов и способов оценки работоспособности и восстановления ресурса элементов технических устройств. И для обеспечения безопасной эксплуатации ответственных конструкций все более широкое распространение получает концепция, основанная на «прогнозировании и предупреждении» вместо используемой старой концепции «обнаружение и устранение» [1].

Объектом исследований данной статьи, являются гибы пароотводящих и водоопускных труб паровых котлов типа ТП-87-1, которые эксплуатируются на Ново-Кемеровской ТЭЦ (г. Кемерово) (рис. 1).



Рисунок 1 – Общий вид гиба пароотводящей трубы барабана котла ТП-87-1

Для обнаружения дефектов используют различные методы испытаний, которые делятся на две большие группы[2]:

- Разрушающие методы исследований;
- Неразрушающие методы исследований.

К разрушаемым методам исследований относятся испытания на разрыв, испытания на ударную вязкость, анализ на содержание карбидов и металлографические испытания [3]. Главным недостатком вышеперечисленных методов является то, что для проведения эксперимента необходимо выводить из строя оборудования, и останавливать, таким образом, производство.

Поэтому, в целях обнаружения дефектов в производственных условиях и без выхода из строя оборудования, применяют различные методы неразрушающего контроля.

Для большинства современных методов неразрушающего контроля и применяемых в них приборах важны, так называемые, корреляционные зависимости. Зная характеристики металла, находящегося в предельном состоянии (величина остаточных напряжений, величина предела текучести) и значения характеристик, полученных на различных приборах (время задержки и скорость распространения импульсов поверхностных акустических волн – спектрально-акустический метод; коэрцитивная сила) для этого же состояния, можно построить зависимость и вывести закономерности. Которые потом, при наличии большого объема проведенных экспериментов и хорошей сходимости результатов, можно будет использовать как самостоятельные методы.

При этом одним из наиболее перспективных методов контроля состояния металла сварных соединений, основного металла и выявления несплошностей в настоящее время считается акустический метод. Ранее авторами [4–7] было установлено, что спектрально-акустический метод контроля является чувствительным методом оценки локальных полей внутренних напряжений и параметров микроструктуры (плотности дислокаций, кривизны-кручения кристаллической решетки и т.д.). Кроме того, акустические характеристики материалов (скорость распространения упругих волн, затухание и дисперсия, акустический импеданс) имеют связь с механическими свойствами материалов. Это позволяет по акустическим характеристикам материала судить о его механических свойствах. Авторами [4–7] предложены комплексные критерии степени поврежденности металла в относительных единицах. Однако, исследования проводились лишь для паропроводов, изготовленных из различных теплоустойчивых сталей перлитного класса.

Авторами были проведены исследования состояния образцов металла гибов пароотводящих и водоопускных труб (таблица).

Таблица – Общие характеристики образцов металла гибов пароотводящих и водоопускных труб

Номер образца	Описание образца	Материал	Длительность эксплуатации
Образец №1 (рис. 2, *а*)	Гиб водоопускной трубы фронтового экрана Ø159×12. Дефект: коррозионно-усталостная трещина, развившаяся по технологической риске на внутренней поверхности нейтральной зоны.	Ст.20	219 тыс. ч.
Образец №2 (рис. 2, *б*)	Гиб пароотводящей трубы фронтового экрана Ø133×13. Дефект: технологический закат, на наружной поверхности нейтральной зоны, с L≈400 мм.	Ст.20	242 тыс. ч.
Образец №3 (рис. 2, *в*)	Гиб пароотводящей трубы фронтового экрана Ø133×13. Дефекты отсутствуют.	Ст.20	242 тыс. ч.

Исследование проводилось при помощи измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН». Были проведены прецизионные измерения времени распространения (задержек) и отношения размахов ультразвуковых импульсов (коэффициент затухания), распространяющихся в материале исследуемого объекта. Для этого были подготовлены зоны контроля, на поверхности образцов. После этого были сделаны замеры параметра R, с расположением датчика вдоль и поперек относительно центральной оси гиба. Ниже приведен график с результатами измерений (рис. 3).

Другим перспективным методом контроля состояния длительно работающего металла и выявления несплошностей считается магнитный метод измерения коэрцитивной силы. Изучению изменений магнитных характеристик в различных металлических материалах также посвящено большое количество работ [8].



а) *б)* *в)*

Рисунок 2 – Образцы для проведения исследований (таблица):
а – Образец №1; *б* – Образец №2; *в* – Образец №3

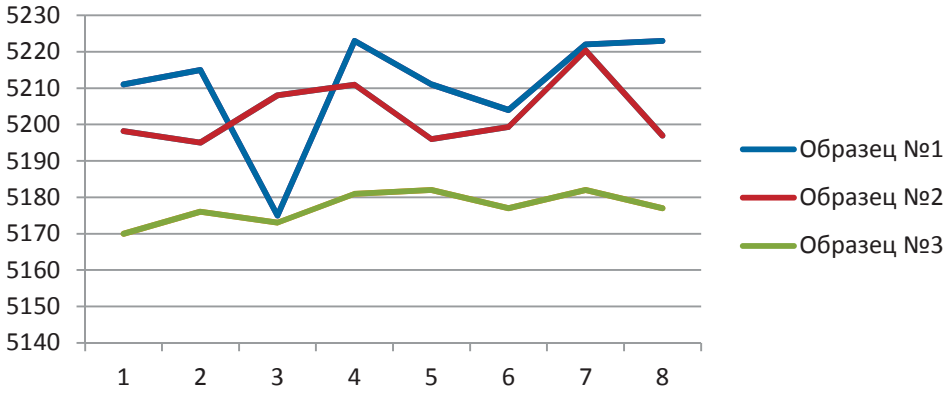


Рисунок 3 – Результаты измерения времени задержки поверхностных акустических волн относительно центральной оси гиба (продольное расположение датчика)

Принцип действия, применяемого при этом методе магнитного структуроскопа «КРЦ-К-К2М» основан на измерении одной из характеристик магнитного поля объекта – коэрцитивной силе. Данным методом были выполнены измерения данной характеристики в металле исследуемых образцов. Измерения производились на тех же участках, что и спектрально-акустическим методом с расположением датчика вдоль и поперек относительно центральной оси гиба. Ниже приведена гистограмма с результатами измерений (рис. 4).

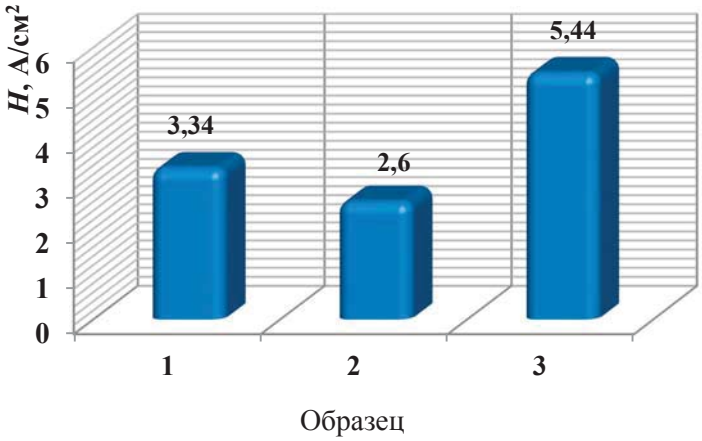


Рисунок 4 – Результаты измерения коэрцитивной силы относительно центральной оси гиба (продольное расположение датчика)

Выводы

1. Выполнены исследования образцов металла эксплуатируемых и поврежденных гибов пароотводящих труб с наработкой 214 тыс. часов и 242 тыс. часов акустическими и магнитными методами.

2. Результаты измерения акустических и магнитных характеристик показали, что:

- Для образцов №1 и №2, имеющих дефекты, характерны более высокие значения *R* и более низкие значения *H*, чем для образца №3.
- Так как на образцах №1 и №2 имеются дефекты, поэтому средние значения *R* и *H* для этих образцов близки, но отличаются от образца №3, который не имеет дефектов.

3. Планируется выполнить аналогичные эксперименты для других сроков наработки гибов пароотводящих и водоопускных труб, а также металла в исходном состоянии. Это позволит получить относительно полную картину о изменении акустических и магнитных характеристик в процессе эксплуатации оборудования, а также построить графические зависимости значений измеренных характеристик от времени наработки оборудования.

Список литературы

1. *Смирнов, А. Н.* Анализ проблем, связанных с безопасной эксплуатацией элементов энергетического машиностроения / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 12–17.

2. *Алешин, Н. П.* Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2006. – 368с.

3. СТО-021-21-21-2003. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов тепловых электрических станций. Контроль состояния металла. Нормы и требования.

4. *Смирнов, А. Н.*, Хапонен, Н.А. Способ неразрушающего контроля степени поврежденности металлов эксплуатируемых элементов теплоэнергетического оборудования. Патент РФ, №2231057. 2004.

5. *Смирнов, А. Н.* Повреждаемость сварных соединений. Спектрально-акустический метод контроля / А. Н. Смирнов, Н. А. Конева, Н. А. Попова, С. В. Фольмер, Э. В. Козлов // М.: Машиностроение, 2009. – 278 с.

6. *Смирнов, А. Н.* Структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений и акустические характеристики в длительно работающем металле поврежденного барабана котла высокого давления / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Э.В. Козлов и др. // Контроль. Диагностика. – 2012. – №7. – С. 13–17.

7. *Смирнов А. Н.* Локальные поля напряжений в сварных соединениях, спектрально-акустический метод их выявления и синергетический подход к материаловедению / А.Н. Смирнов, С.В. Фольмер, Н.В. Абабков // Вестн. Кузбасского гос. техн. унив., 2009, №3. С. 28–38.

8. *Абабков, Н. В.* Оценка состояния наплавленного металла барабана котла высокого давления по коэрцитивной силе металла / Н. В. Абабков, А. Н. Смирнов, А. И. Копытов, А. А. Трубин // Вестник КузГТУ. 2011. № 2. – С. 57–60.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ, соглашение № 14-19-00724.

THE STUDY OF OPERATED AND DAMAGED BENDS METAL OF STEAM-DEFERENT BY ACOUSTIC AND MAGNETIC METHODS

Ababkov N.V., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: n.ababkov@rambler.ru,
Smirnov A.N., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: galvas.kem@gmail.com
Zavsegolov A.A., M.Sc. (Engineering), e-mail: anton.zavsegolov@mail.ru

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

Abstract: The operated and damaged bends metal of steam-deferent acoustic and magnetic methods is studied in the paper. In particular, the sample does not damage the sample with corrosion fatigue crack and the specimen with the process defect are studied. All samples were made of steel 20, but have different operating time. The graphic dependences of acoustic and magnetic characteristics of the operating time are built. A values of acoustic and magnetic characteristics corresponding to a defective condition of steam-tube bends made of steel 20 are mounted.

Keywords: bends of steam-deferent, spectral-acoustic method, magnetic noise method, the study of metal.

УДК 669.1:669.017.11

О СОВРЕМЕННОМ РАЗВИТИИ ДИАГРАММЫ Fe– C И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОМ ПРИМЕНЕНИИ

В. К. АФАНАСЬЕВ, доктор техн. наук, профессор

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
e-mail: in_afanaseva@mail.ru

Аннотация: Акцентируется внимание на воздействии атмосферы водяного пара как неотъемлемом условии выплавки и последующей обработки сплавов системы Fe–C на их свойства. Предложено рассматривать диаграмму состояния железоуглеродистых сплавов как многокомпонентную: Fe–C–H–N–O. Настоящий подход базируется на представлении о ведущей роли водорода и его разновидностей в формировании структуры и свойств сплавов и позволяет существенно повысить их механические и физические свойства при снижении стоимости и вредного воздействия на окружающую среду. В качестве примеров практической реализации приведен новый вариант диаграммы Fe–C. Предлагается считать основными состояниями газожидкое и газотвердое, различающиеся содержанием $H^{-}_{\text{изб. АВП}}$.

Ключевые слова: водород, диаграмма состояния, атмосфера водяного пара, примеси, газожидкое состояние, газотвердое состояние, водородные точки.

Введение

Земная кора, то есть поверхность нашей планеты, состоит из набора смесей химических элементов.

По распространению железо занимает одно из ведущих мест в рудах магматического и осадочного происхождения. Поэтому ему всегда будет уделяться большое внимание, так как сплавы на основе железа (чугуны и стали) до сих пор остаются «становым хребтом» цивилизации.

Однако к настоящему времени ресурс свойств чугуна и углеродистой стали остается далеко не выработанным.

Неумение получить более высокие свойства их вылилось в особый раздел современных материалов – это легированные сплавы на основе Fe–C.

Легирование с нарастающей скоростью повышает стоимость сплавов, что в конечном итоге оправдывает поиск других материалов с требуемыми свойствами (керамических, на основе нитрида бора и других – часто экзотических), стоимость которых еще выше и растет с ускорением.

Легированные чугуны и стали практически вытеснили из сферы производственной деятельности нелегированные железоуглеродистые сплавы. Это произошло в связи с недостаточностью, а часто полным отсутствием, основополагающих знаний о сущности формирования их свойств.

Теория

Первой причиной такого бедственного положения является недоработка самого главного – диаграммы состояния Fe–C.

«Появление в 1948 – 1949 гг. трех различных официальных диаграмм свидетельствовало о том, что, несмотря на исследования, проведенные в течение нескольких десятков лет учеными разных стран, проблема диаграммы Fe–C не была еще окончательно решена. Эти диаграммы отличались между собой координатами многих характерных точек, формой некоторых кривых и, кроме того, американская и немецкая диаграммы были двойными диаграммами, в то время как советская диаграмма была единой» [1].

Теперь, через многие годы, становится ясным, что различные действия в этом плане упускают положение о том, что все фазовые и структурные составляющие этих диаграмм полностью определяются присутствием неучитываемых элементов – водорода, азота и кислорода.

Только в таком случае диаграмма будет служить руководством к эффективным практическим действиям.

Здесь важно отметить, что уже в 1899 году признанный отец диаграммы Fe–C Робертс-Аустен независимо от критических точек A_{r3} и A_{r2} открыл в электролитическом железе еще неоднократное выделение тепла. Соответствующие температуры он назвал «водородными» точками, так как появление этих тепловых эффектов он приписывал присутствию водорода, поглощенного железом; после неоднократного прокаливания соответствующей пробы в вакууме эти тепловые эффекты не удалось обнаружить. Водородную точку при температуре 487 °C Робертс-Аустен объяснял выделением гидрида железа из твердого раствора, а водородную точку при температуре 261 °C он приписывал твердой эвтектике железо – гидрид железа. Водородную точку при температуре между 600 и

550 °С он не объяснял. Последующие ученые не подтвердили существования «водородных точек», и эти точки в дальнейших диаграммах уже не обозначались.

При температуре около 600 °С Робертс-Аустен в своей диаграмме дал, кроме того, критическую точку A_{r0}, которая, по его мнению, должна была соответствовать магнитному превращению» (рисунок 1) [1].

Следует считать предложенное великим авторитетом в этой области чрезвычайно важным, так как он первый отметил процессы в интервалах 200–300, 400–450 и 550–600 °С, которые в последующем окажутся важнейшими в металлических системах. То обстоятельство, что он связал процессы, протекающие в этих температурных интервалах, с присутствием водорода, видимо, было главной отправной вехой, которую современники и их последователи аккуратно предали забвению.

Последнее оказало катастрофически вредное влияние на дальнейшую историю развития диаграммы.

Второй причиной является то, что все три официальных варианта диаграмм имеют один и тот же недостаток, заключающийся в полном игнорировании процессов, протекающих при температурах ниже 600 ºС. До сих пор современная немецкая диаграмма обрывается при 500 ºС (Брокгауз, 2001).

А.А. Жуков, внесший большой вклад в развитие диаграммы, опустил температурную составляющую до 200 ºС. Более того, он внес на диаграмму две дополнительных горизонтали. Первая приблизительно при 580 ºС и вторая – при 400 ºС, что явилось следствием их поиска путей получения алмаза в качестве основной фазовой составляющей [2].

Третья причина заключается в том, что победила точка зрения, выделяющая наличие, а потом и главенствующую роль, полиморфизма.

Это происходило с трудом и временем. В самом начале (20-е годы XX века) в дискуссии о правомочности полиморфизма побеждали сторонники ведущей роли водорода и примесей в организации Fe γ.

Так, «другие ставили под сомнение аллотропию как явление, присущее самому железу, и причиной аллотропических превращений считали только присутствие примесей.

Примесями, вызывающими аллотропические изменения в железе Йенсен считал те, которые растворяются в железе, образуя с ним растворы внедрения, то есть, главным образом, углерод и кислород» [1]. На то время уже было известно, что «железо может содержать в твердом растворе 0,02 – 0,05 % O_2 при комнатной температуре и 0,02 % O_2 при температуре 1530 °С». Исследователи того времени считали, что «превращения A_3 в железе имеет двустепенный характер и высказывали предположение, что причиной раздвоения этого изменения может быть присутствие очень малых количеств примесей, например, водорода» [1]. В 1933 г. Эссер при определении влияния водорода на ход превращения A_3 в железе и превращения A_1 в стали пришел к выводу, что аллотропия железа в значительной степени зависит от примесей.

Поэтому с тех лет установившаяся двойная диаграмма (Fe – Fe_3C и Fe – Г), полиморфизм (наличие γ-Fe независимо от содержания водорода и других примесей), полное забвение «водородных» точек Робертс-Аустена, обрыв диаграммы при 600 и 500 °С – это главное, что привело к окончательной и печальной победе.

Результатом ее является процветание стального передела, удаление на второй план углеродистой стали и чугуна и легирование методом проб и ошибок всеми доступными, подчас очень дорогими, элементами.

Результаты и обсуждение

Сегодня, исходя из положения о ведущей роли водорода и на основании водородной платформы ПСЭ [3], нами предлагается ряд действий, позволяющих более глубоко понять основы формирования свойств Fe–C-сплавов с целью дальнейшего их повышения.

Металлургия во всех своих аспектах определяется атмосферой Земли (атмосферой водяного пара АВП). Из этой атмосферы металлы и сплавы поглощают $H^-_{изб.\ АВП}$ [4].

Этот $H^-_{изб.\ АВП}$ есть всегда, так как всегда есть влажная атмосфера Земли. Всё, что рождается на Земле, в том числе металлы и сплавы, содержит водород и две его разновидности – азот и кислород, составляющие эту атмосферу. Именно такой водород в трех лицах формирует структуру земных металлов и сплавов в следующем порядке

:

1 вакансия → *2* скопление вакансий → *3* дислокация → *4* скопление дислокаций →

→ *5* граница зерна → *6* мелкие выделения (эвтектика) → *7* крупные выделения (первичные кристаллы)

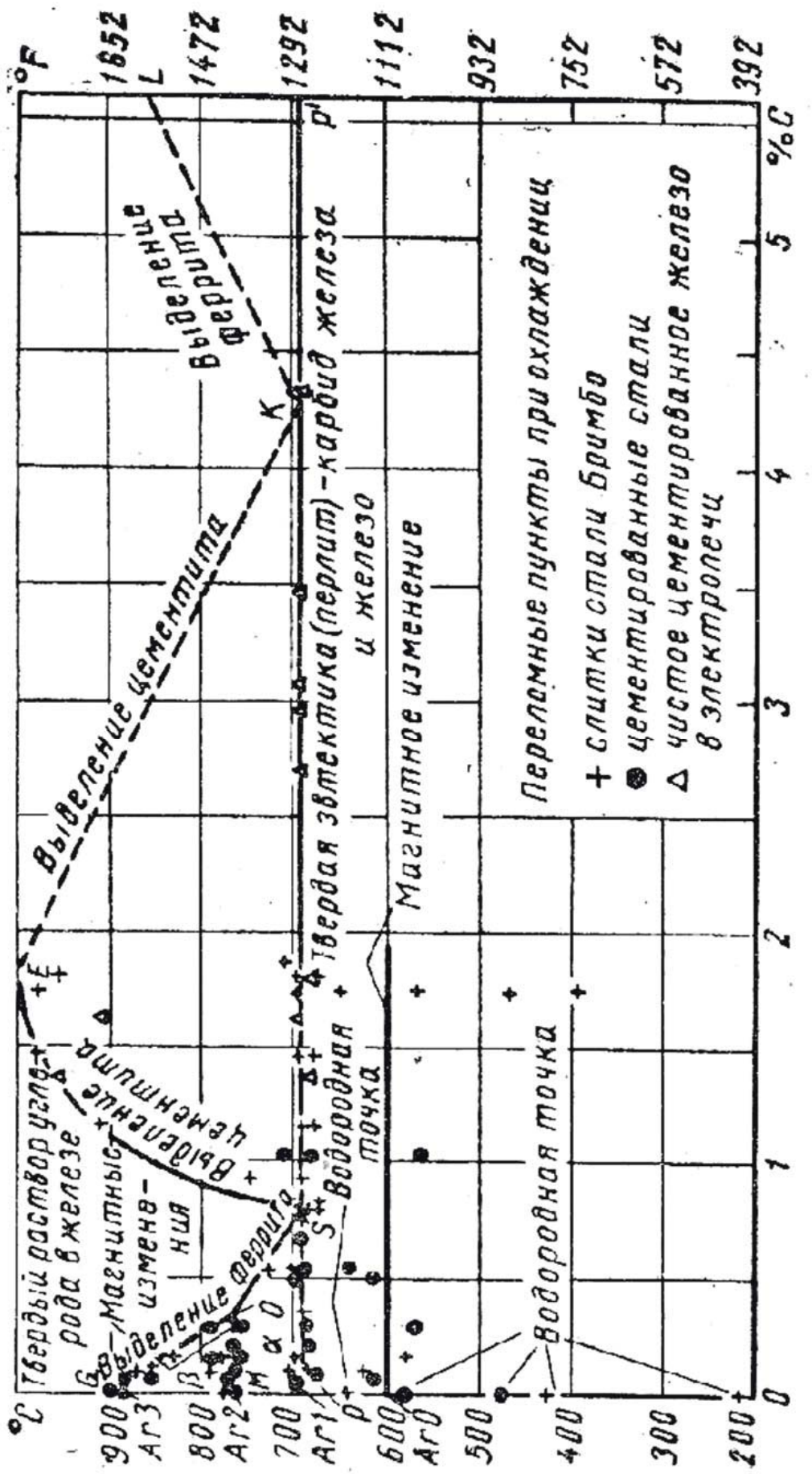


Рисунок 1 – Диаграмма Робертс-Аустена [1]

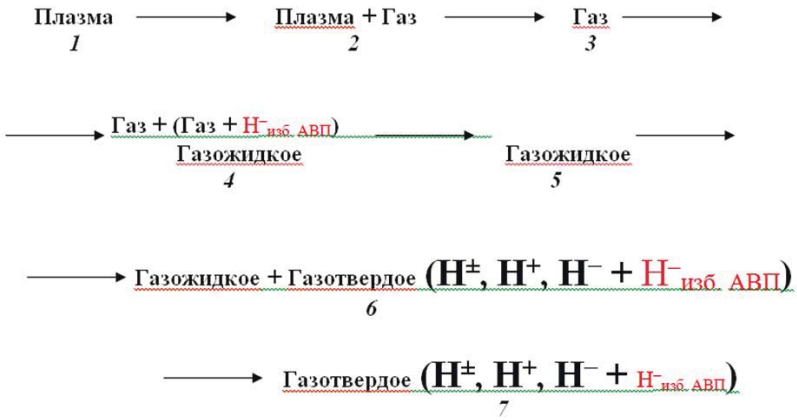
Схематически современное представление диаграммы Fe–C может быть представлено следующим образом (рисунок 2).

Здесь важно отметить, что семь температурных интервалов газотвердого состояния проходят через всю жизнь различных металлов и сплавов.

Робертс-Аустен закладывал интервалы 200–300, 400–450 и 550–600 °C, назвав их «водородными точками». Каждый из этих интервалов имеет свой смысл, и в нем протекают все те же три водородные реакции с выдачей своего продукта.

На предлагаемой схеме (рисунок 2) пунктиром отмечено наличие γ-Fe и его последствия («стальной угол»).

После 7 интервалов в газотвердом состоянии происходят 7 процессов превращения вещества в изначальное состояние – плазму и формирование из нее железа, чугуна и стали.



Космический газ (межзвездный, межпланетарный, Солнечный ветер) при встрече с земным $H^-_{изб.\ АВП}$ образует газоконденсат – вода H_2O, а в данном случае, «металлическая жидкость».

Такое добавление очень важно, поскольку нынешняя плавильная металлургия заключается в том, что $H^-_{изб.}$ атмосферы Земли в любых нагревательных устройствах встречается с космическими газами, выделяющимися из руды. В связи с этим и образуется «металлическая жидкость». В этом расплаве, как известно, рождаются все свойства применяемых сплавов Fe–C.

В естественных земных условиях металлургия реализуется только в виде 7^e – газотвердое, 6^e – газотвердое + газожидкое и 5^e – газожидкое состояние, а остальные четыре существуют в области $T_{исп}$ и нам недоступны.

Примеров применения водорода, азота и кислорода в качестве легирующих и ответственных за все свойства сплавов Fe–C много. Но до сих пор очень распространено мнение, что водород в чугуне и стали вреден.

Такое ошибочное представление ошибочно в первую очередь потому, что на сегодняшний день известна ведущая роль водорода в построении Вселенной и всех ее субъектов (планета Земля, человек, металл и все остальное).

Совсем недавно, 6 марта 2014 в НИТУ «МИСиС» собиралась мировая научная элита. На этом форуме профессором кафедры Материаловедения и металлургии Кембриджского университета (Великобритания) Гарри Бхадешем была прочитана лекция по теме водорода в сложных микроструктурах. Результатом работ по водороду в стали стало создание технологии производства супербейнита, уникально сочетающего повышенную прочность и твердость с высокой пластичностью. Им отмечено, что такой материал может быть использован в качестве брони. При добавлении в сталь добавок кремния и получения водородистого супербейнита сталь пригодна для изготовления рельсов. Рельсы из бейнитной стали, произведенной по технологии проф. Бхадеша, проложены под Ла Маншем, а также по всей Великобритании и во многих странах Евросоюза.

Это еще раз подтверждает правомочность изложенных в настоящей работе положений по перспективе развития диаграммы Fe–C, а затем чугуна и стали с ведущей ролью водорода для выработки далеко не исчерпанного ресурса свойств железоуглеродистых сплавов.

Автор надеется, что читатель будет полностью согласен с выдающимся ученым и специалистом в области водородной металлургии Борисом Александровичем Колачевым: «В отдельную область под названием «водородное материаловедение» можно выделить разработку материалов и способов их получения, в которых водород играет основную функциональную роль. Учитывая непредсказуемость поведения водорода, можно ожидать новые примеры его полезных проявлений в металлах. Все это, безусловно, будет определять создание материалов третьего тысячелетия».

Выводы

Предлагается рассматривать ведущую роль водорода в формировании свойств сплавов Fe–C в связи с предлагаемой схемой диаграммы с семью температурными интервалами и семью состояниями

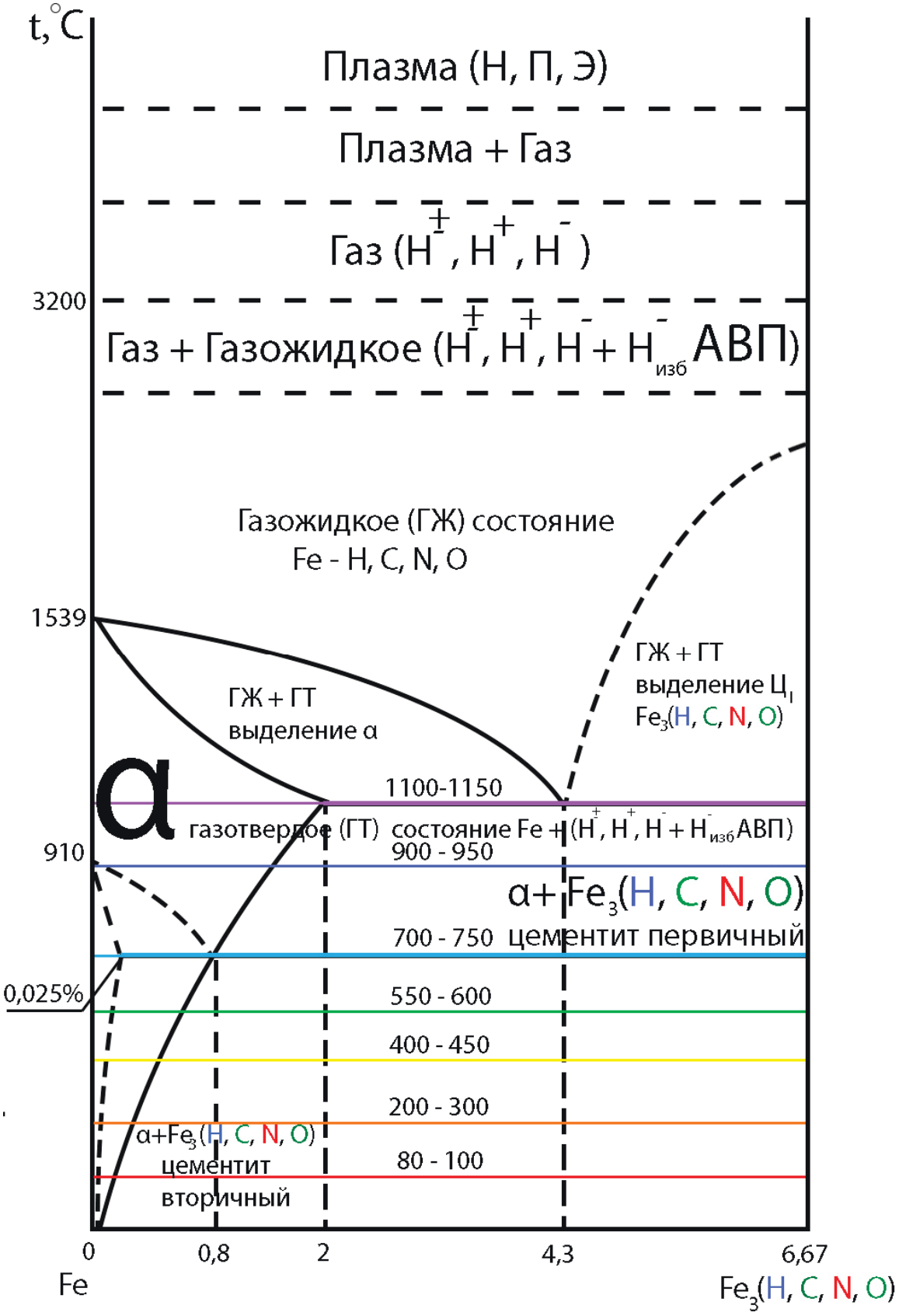


Рисунок 2 – Схематическое изображение водородной диаграммы Fe–C

Список литературы

1. Тыркель Е. История развития диаграммы железо-углерод / Е. Тыркель. – М.: Машиностроение, 1968. – 280 с.
2. Жуков А.А. О диаграмме состояния сплавов системы Fe–C / А.А. Жуков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1988. – № 4. – С. 2-9.
3. Афанасьев В.К. Водородная платформа периодической системы элементов / В.К. Афанасьев // Металлургия машиностроения. – 2011. – №2 – С. 21-26.
4. Афанасьев В.К. О создании новых легких деформированных сплавов для космической техники / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, В.А. Самонь // Металлургия машиностроения. – 2014. – №5 – С. 21-28.

ABOUT MODERN DEVELOPMENT OF THE CHART FE-C AND ITS PRACTICAL APPLICATION

Afanasyev V.K., Dr. Sc. (Engineering), Professor, e-mail: in_afanaseva@mail.ru

Siberian state industrial university, 42 Kirov str., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract: Focuses on the effects of atmospheric water vapor as an essential condition of melting and subsequent processing of alloys of Fe - C on their properties. Proposed to consider the phase diagram of iron-carbon alloys as a multicomponent: Fe - C - H - N - O. This approach is based on the concept of the leading role of hydrogen and its variants in determining the structure and properties of alloys and can significantly improve their mechanical and physical properties at lower cost and harmful effects on the environment. As examples of the practical implementation of a new version of the chart shows the Fe - C. It is proposed to consider the ground states of gas-liquid and gas-solid differing content of $H^{-}_{excess\ (atmosphere\ of\ water\ vapor)}$.

Keywords: hydrogen, a state diagram, atmosphere water vapor, impurities, gas-liquid state, gas-solid state, hydrogen point.

УДК 629.78

ТЕХНОЛОГИЯ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ С НАНЕСЕНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ

В. Н. БЕЛЯЕВ[1,2], *канд. техн. наук, доцент*,
Е. Ю. Татаркин[3], *доктор. техн. наук*, профессор
([1]*АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск,* [2]*БТИ АлтГТУ, г. Бийск,* [3]*АлтГТУ, г. Барнаул*)

Беляев В.Н. – 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Алтай»,
e-mail: lab.nanodiamond@rambler.ru

Аннотация: В работе представлены результаты исследования отделочно-упрочняющей обработки деталей обкатыванием с нанесением функционального покрытия. При данном способе обработки одновременно с деформацией металла формируется антифрикционное медное для снижения трения при эксплуатации детали. При экспериментальных исследованиях варьировались режимные параметры обкатывания и установлены зависимости толщины медного покрытия.

Ключевые слова: обкатывание, покрытие.

Введение

Высокие эксплуатационные характеристики изделий можно обеспечить применением отделочно-упрочняющей обработкой деталей поверхностно-пластическим деформированием. Одним из способов ППД является обкатывание с одновременным нанесением антифрикционных покрытий [1].

В работах [2,3] приведены результаты исследований влияния режимов обработки на шероховатость, микротвердость поверхностного слоя, влияние на износостойкость формирующегося медного покрытия. При этом, отсутствие данных о влиянии режимов обработки при обкатывании на толщину медного покрытия определило необходимость дополнительных исследований в данной области.

Методика экспериментального исследования

В качестве экспериментальных использовались образцы диаметром 70 мм из стали 45 ГОСТ 1050-88, технологическая жидкость, используемая при обкатывании – глицерин с пятиводным сульфатом меди $CuSO_4*5H_2O$, Обработка производилась на токарно-винторезном станке 16К20Ф3 при варьировании подачи инструмента, скорости обработки (вращения детали), давлении технологической жидкости.

Толщина формируемого покрытия оценивалась методом растровой электронной микроскопии (рисунок 1).

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований были получены зависимости толщины медного покрытия от режимов обкатывания, представленные на рисунках 2-4.

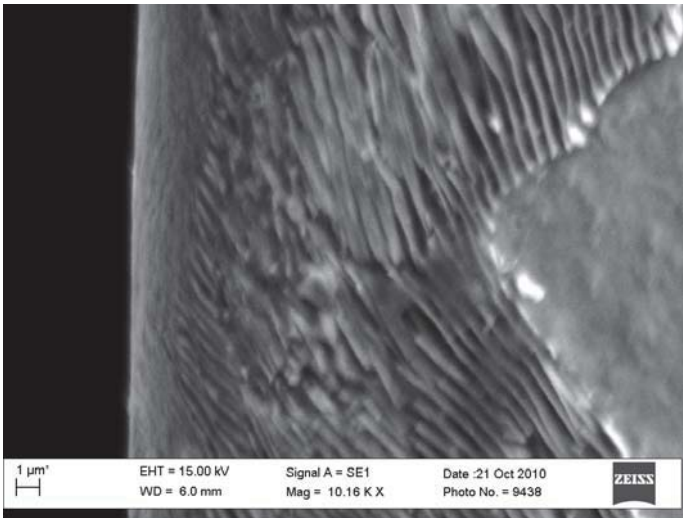


Рисунок 1 – Изображение структуры образца с медным покрытием

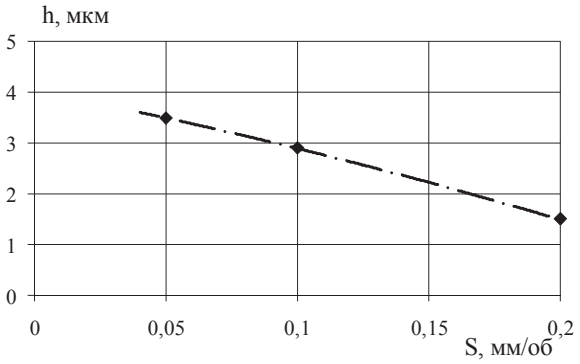


Рисунок 2 – Зависимость толщины покрытия от подачи

Анализ полученных зависимостей показал, что при увеличении подачи уменьшается кратность приложения давления на единицу площади поверхности детали, что приводит к уменьшению времени протекания процесса формирования покрытия между деформирующим шаром и обрабатываемой поверхностью.

Скорость обработки влияет на толщину формируемого покрытия неоднозначно. В начале, с увеличением скорости значение толщины покрытия снижается, что можно объяснить, так же как и влияние подачи, уменьшением времени реализации окислительно-восстановительного процесса. Затем, преодолев минимум в диапазоне скоростей 150-200 м/мин, величина формируемого покрытия возрастает. Это можно объяснить тем, что с увеличением скорости возрастает температура в зоне обработки, что приводит к возрастанию скорости протекания химических реакций на поверхности детали.

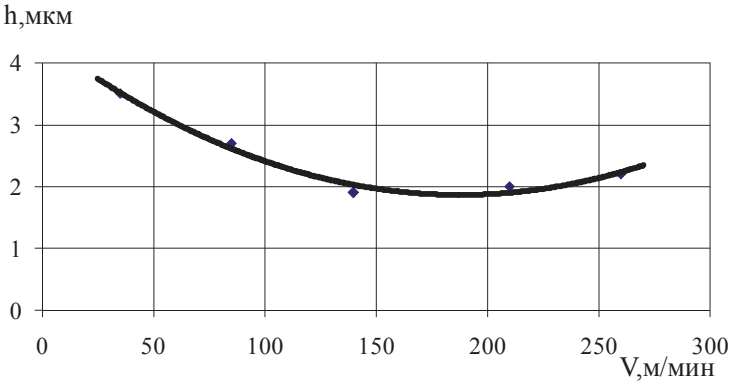


Рисунок 3 – Зависимость толщины покрытия от скорости обработки

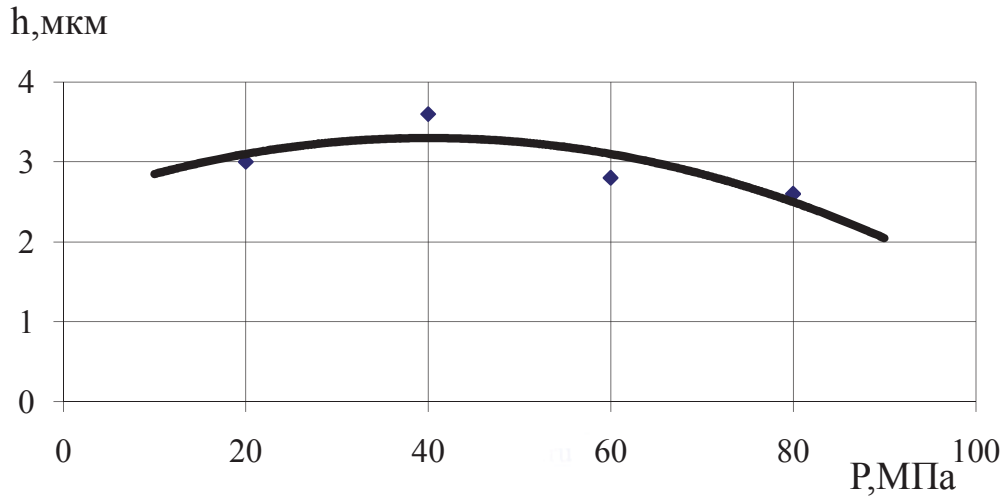


Рисунок 4 – Зависимость толщины покрытия от давления технологической жидкости

В исследуемом диапазоне увеличение давления технологической жидкости приводит к формированию больших толщин медного покрытия, что обусловлено ускорением химических реакций. При этом при значениях давления более 50 МПа толщина медного покрытия снижается, что можно объяснить уменьшением слоя технологической жидкости между деформирующим шаром и обрабатываемой поверхностью. И, вероятнее всего, при больших значениях давления процесс образования покрытия будет протекать дискретно.

Выводы

Проведенные исследования отделочно-упрочняющей обработки деталей обкатыванием с нанесением функционального покрытия по определить зависимости толщины формируемой меди от режимов обработки. Эти данные дополняют проведенные ранее исследования и позволяют сформировать рекомендации по технологическим режимам отделочно-упрочняющей обработки деталей обкатыванием.

Список литературы

1. *Беляев В.Н. и др.* Способ совмещенной обработки деталей. // Патент РФ № 2423219, 10.07.2011.

2. *Беляев В.Н.*, *Татаркин Е.Ю.* Влияние смазывающе-охлаждающей технологической среды на качество поверхности при обкатывании / Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2013. - №2. – С. 12-18.

3. *Беляев В.Н.* Технологическое обеспечение долговечности деталей при обкатывании / Эффективные технологии пластического деформирования и комбинированной обработки. //Коллективная монография под ред. А.В. Киричека.–М.: Издательский дом «Спектр», 2014.– С. 221-252.

TECHNOLOGY ROLLING OF DETAILS WITH FORMING FUNCTION COATING

Belyaev V. N.[1,2], C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: lab.nanodiamond@rambler.ru

Tatarkin E. Yu.[3], D.Sc. (Engineering), Professor e-mail: etatarkin@mail.ru

[1]SC “Federal research & production center Altai”, 1 street Socialisticheskay, Biysk, 659322, Russian Federation

[2]Biysk technology institute (filial) I.I. Polzunov Altai State Technical University, 27 street Tpofimov, Biysk, 659305, Russian Federation

[3] I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 pr. Lenin, Barnaul, 656046, Russian Federation

Abstract: This work is devoted to researching rolling with a hydraulic driver. The carried-out system analysis of the surface plasticity deformation methods allowed to define the main directions of their improvement consisting in creation of conditions at the same time with deformation of metal to put antifrictional covering, to modify a blanket, to influence friction processes for ensuring durability of details. As a result of pilot studies regime parameters, viscosity of technological liquid and its structure varied, dependences of a roughness and microhardness are established, the assessment of wear resistance of a blanket is carried out. The analysis of existing designs of applied tools for the combined processing of details by turning and the surface plasticity deformation is carried out. The developed original method and tools for realization of the combined processing of details are given. Their efficiency is almost confirmed at an processin of foundry aluminum alloys

Keywords: rolling, coating.

УДК 621.9.06:518.4

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТОЧНОГО ХРОМИРОВАНИЯ

В. Н. БЕЛЯЕВ, *канд. техн. наук, доцент*,
А. Ю. КОЗЛЮК, *канд. техн. наук*,
А. С. Андреев, *инженер*,
А. В. Лобунец, *инженер*
(*АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, Россия*)

Беляев В.Н. – 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Алтай»,
e-mail: lab.nanodiamond@rambler.ru

Аннотация: Представлены результаты исследования проточного хромирования с непрерывным вращением изделия внутренней поверхности цилиндрических труб при формировании многослойных покрытий. При реализации процесса нанесения хромового покрытия изменялась температура электролита для обеспечения осаждения твердого или молочного хрома в определенный промежуток времени. Это требовалось для создания слоев покрытий с определенными характеристиками: молочный хром – осадки с мелкозернистой структурой, высокой адгезией к основе и малыми внутренними напряжениями; твердый хром – осадки с высокой твердостью. Чередование «мягкого» и «твердого» слоев должно обеспечить взаимную компенсацию внутренних напряжений, формирующихся в покрытии. В ходе экспериментальных исследований были получены образцы покрытий, проведен их рентгенно-структурный анализ. Результаты исследований показали возможность формирования многослойных хромовых покрытий и повышения эффективности проточного хромирования.

Ключевые слова: проточное хромирование, многослойное покрытие, структура.

Введение

Высокая твердость и износостойкость, низкий коэффициент трения, высокая химическая стойкость и другие свойства хромовых покрытий обеспечивают различные области их применения в машиностроении и значительную долю в технологиях упрочняющих функциональных покрытий. Одной из областей применения электрохимического хромирования является нанесение покрытий на внутреннюю поверхность труб для нефтяной отрасли, а также других различных изделий. При изготовлении таких длинномерных деталей применяют технологию хромирования в проточном электролите (проточное хромирование).

Хромирование в проточном электролите осуществляется при помощи специальных установок, обеспечивающих принудительную подачу электролита в пространство между поверхностями покрываемой детали и анода. Принудительная подача электролита обеспечивает его непрерывную смену и равномерное газонасыщение в межэлектродном объеме. В проточном электролите происходит сглаживание осадка, что позволяет получать твердые блестящие покрытия или молочные износостойкие покрытия при больших плотностях тока.

При гальваническом хромировании, также как и при осаждении других покрытий, важнейшей проблемой является достижение равномерности параметров формирующихся осадков, в том числе и геометрических, по всей поверхности покрываемой поверхности детали. Для этого хромирование в проточном электролите проводят при вращении детали-катода.

Одним из недостатков хромовых покрытий является их высокая хрупкость, склонность к скалыванию, трещины, пористость и др., что приводит к резкому снижению эксплуатационных характеристик деталей. Особенно эти недостатки проявляются при эксплуатации изделий при циклических, знакопеременных нагрузках и в условиях действия агрессивных сред. В связи с чем, разработка и исследование способов повышения эффективности проточного хромирования является важной научно-практической задачей.

Теория и методика экспериментального исследования

При хромировании свойства формирующихся осадков зависят от температуры и химического состава электролита, плотности катодного тока. Как правило, изменения условий осаждения и, как следствие, свойств покрытий достигают варьированием температуры электролита. Таким образом, существует возможность в процессе нанесения хромового покрытия, изменяя температуру электролита в большую или меньшую сторону, получать многослойное покрытие с разными по слоям свойствами. Это обеспечит беспористость покрытий, снижение вероятности отслаивания покрытий при циклических нагрузках.

Для подтверждения данной гипотезы проводились экспериментальные исследования проточного хромирования с вращением детали. Схема установки проточного хромирования приведена на рисунке 1. Установка состоит из вращаемого в процессе хромирования относительно своей оси покрываемого изделия 1, напорного 2 и сливного 3 узлов, а также анода 4.

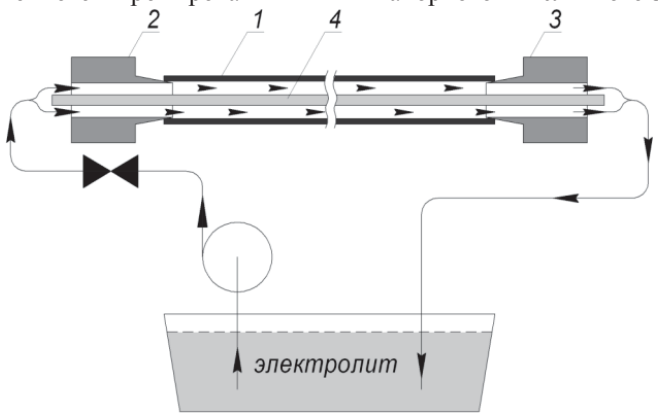


Рисунок 1 – Схема установки проточного хромирования
1 – покрываемое изделие, 2 – напорный узел, 3 – сливной узел, 4 – анод

В качестве изделий для исследований использовались участки цилиндров глубинных штанговых насосов (ГШН) d= 42 мм, длиной 500 мм, на внутреннюю поверхность которых осаждалось хромовое покрытие. Температура стандартного электролита твердого хромирования варьировалась от 50 до 70^{0}С, рабочая плотность катодного тока 50 А/дм^2, частота вращения детали 50 об/мин. Анализ структуры полученных покрытий на образцах труб проводился методом растровой электронной микроскопии.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований были получены хромовые покрытия, изображение структуры которых представлено на рисунке 2.

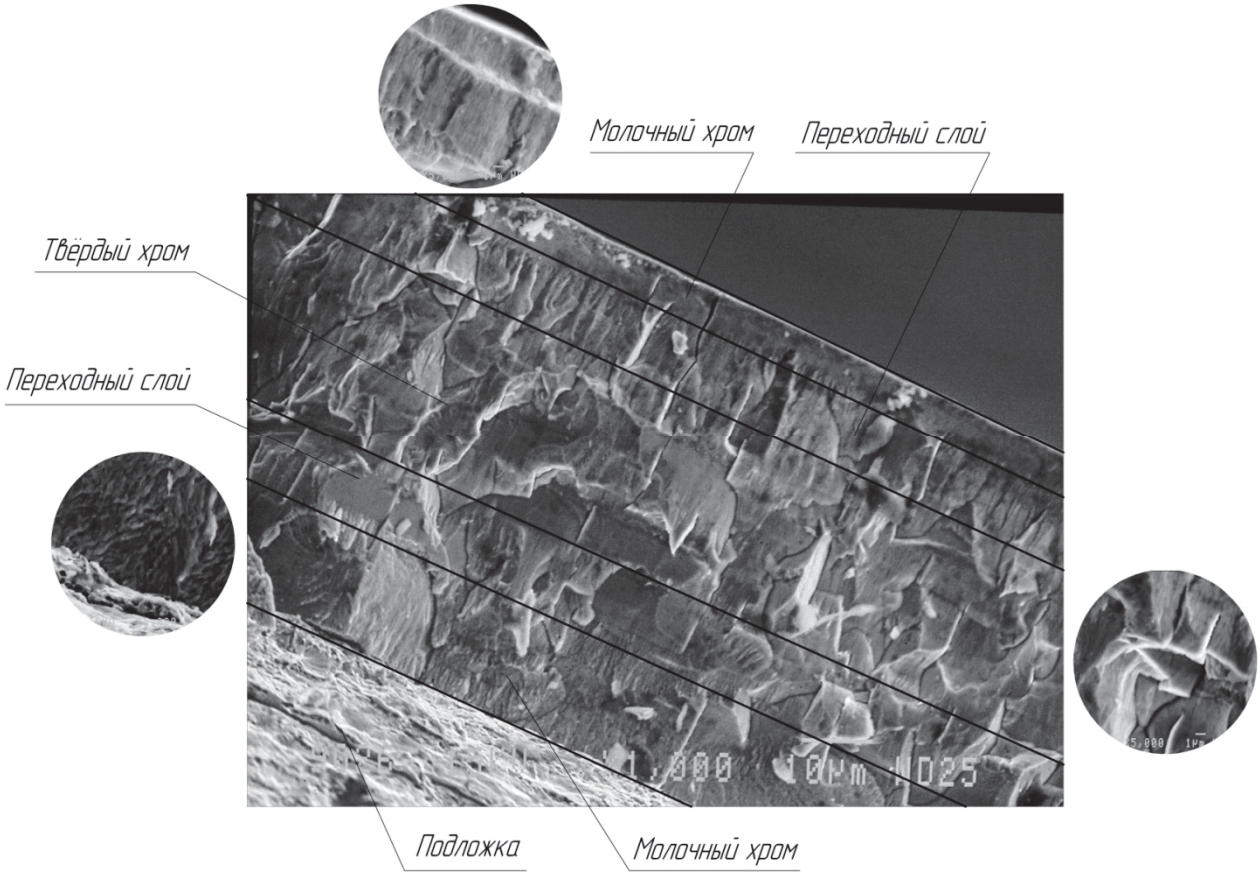


Рисунок 2 – Структура многослойного хромового покрытия

Анализ структуры хромового покрытия показал, что оно состоит из трех выраженных слоев и двух переходных участков между ними. В начале процесса, когда температура электролита составляла 70 ºС, сформировались осадки с мелкозернистой структурой. В период снижения температуры электролита до 50 ºС покрытие представляет собой участки с мелкозернистой структурой, переходящей в блочную крупнозернистую структуру твердого хрома. С обратным повышением температуры электролита вновь формируются осадки с мелкозернистой структурой.

В связи с тем, что охлаждение электролита происходило медленнее чем его нагрев, переходные слои отличаются в размерности. Это дополнительно подтверждает возможность при точном во времени регулировании температуры электролита формировать различные свойства покрытий, а также размеры переходных зон.

Анализ структуры покрытий с других участков поверхности показал схожие результаты, что подтверждает эффективность применения вращения детали при осаждении покрытия при проточном хромировании для обеспечения однородности осадков.

Выводы

Проведенные исследования проточного хромирования с вращением детали показали возможность формирования однородных многослойных осадков с различными свойствами по слоям покрытия. Это обеспечивается изменением температуры электролита в процессе осаждения и позволяет формировать чередующийся молочный или твердый хром. Вращение детали при проточном хромировании позволяет достичь однородных свойств покрытия по поверхности детали. Таким образом, представлен способ повышения эффективности проточного хромирования внутренних поверхностей длинномерных деталей.

INCREASE OF EFFICIENCY OF THE FLOWING CHROMIUM-PLATING PROCESS

Belyaev V. N., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: lab.nanodiamond@rambler.ru

Kozlyuk. A. Yu., C.Sc. (Engineering), e-mail: lab.nanodiamond@rambler.ru

Andreev A. S., Engineer, e-mail: lab.nanodiamond@rambler.ru

Lobunets A. V., Engineer, e-mail: lab.nanodiamond@rambler.ru

SC «Federal research & production center Altai», 1 street Socialisticheskay, Biysk, 659322, Russian Federation

Abstract: The results of research of the flowng chromium-plating are presented with the continuous rotation of detail of internal surface of cylindrical pipes at forming of multi-layered coating. During realization of process of causing of chromium coating the temperature of electrolyte changed for providing of besieging of hard or suckling chrome in the certain interval of time. It was required for creation of layers of coating with certain descriptions: a suckling chrome is fallouts fine-textured, high coupling to basis and small internal tensions; a hard chrome is fallouts with high hardness. Alternation "soft" and "hard" layers must provide mutual indemnification of the internal tensions formed in coating. During experimental researches the standards of coatings were got, their rentgen-structure analysis is coating. The results of researches showed possibility of forming of multilayered chromium coating and increase of efficiency of the flowing chromium-plating.

Keywords: flowing chromium-plating, multi-layered coating, structure.

УДК 629.78

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СМАЗКИ В ПРОЦЕССАХ ГОРЯЧЕЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Е. Г. БЕРДИЧЕВСКИЙ
(НовГУ, г. Великий Новгород)

173003, г. Великий Новгород, Б.Санкт-Петербургская ул., д. 41, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»
popim@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрены пути разработки инновационных технологических смазок для процессов ковки и горячей штамповки. Акцент сделан на использовании модификаторов трения к базовым жидким основам. В качестве модификаторов предложены пиромодификаторы и наномодификаторы. Показана трибологическая эффективность пиро-и наномодификаторов, особенно при использовании синергетического взаимодействия между компонентами.

Ключевые слова: технологические смазки, трибология, модификаторы трения, наноматериалы, горячая штамповка, пиролиз смазочных материалов.

Составы и техника применения технологических смазок в процессах ковки и горячей штамповки металлов не отвечают современным запросам металлообработчиков и нуждаются в инновационных решениях. Такие решения вполне возможны, если отталкиваться от накопленных радикальных достижений в таких отраслях научного знания как теория пластической деформации, механика разрушения, трибология, нефтехимия и др.

Целью настоящей работы является обоснование двух направлений инновационного развития в использовании технологических смазок (ТС) в процессах горячей обработки металлов. Аргументация основана на современной трибологической концепции о многоуровневой зоне фрикционного контакта между инструментом и деформируемым изделием [1], также на структурно-энергетической модели процессов трения и износа [2].

В крайне неоднородной зоне контактного трения можно выделить три масштабных уровня: макроуровень (10^{-3} м), мезоуровень (10^{-6} м), наноуровень (10^{-9} м). Несмотря на то, что четкую границу между уровнями провести сложно, каждому уровню соответствуют свои специфические закономерности. При этом нельзя исключить взаимовлияние процессов, протекающих на разных масштабных уровнях.

Влияние ТС специфично на каждом масштабном уровне. В табл. 1 приведены результаты вычленения основных свойств ТС, определяющих трибологический эффект на каждом масштабном уровне. Основные функциональные свойства ТС разделены на две группы: индивидуальные и контактные. Индивидуальные свойства характеризуют физико-химические свойства ТС, определяемые вне акта трения и пластической деформации. Эти свойства зависят только от состава, строения и химической природы ТС. Контактные свойства ТС проявляются только при их взаимодействии с поверхностями участников фрикционного и пластического контакта.

Можно предположить, что оптимальной ТС является композиция, проявляющая позитивный эффект на каждом из масштабных уровней. Большинство используемых ТС нацелено на достижение трибологического эффекта на макроуровне. При этом часто не принимались в расчет дисперсность компонентов ТС. Так, широко используемые в процессах ковки и горячей штамповки препараты дисульфида молибдена или графита проявляют высокую антифрикционную и противоизносную активность только в коллоидном состоянии [3].

Таким образом, основным направлением в подборе инновационных ТС следует считать обеспечение их трибологической эффективности на всех трех масштабных уровнях контакта, в первую очередь, на мезо- и наноуровнях. При этом важно знать, что компоненты, обеспечивающие нужный уровень свойств на каком-либо масштабном уровне, могут находиться между собой как в антогонистическом, так и в синергетическом взаимодействии [2].

Вариацию функциональных свойств ТС проще всего осуществлять с помощью так называемых модификаторов трения, которые представляют собой присадки к ТС различного химического и фазового состава.

Таблица 1 – Основные трибологические свойства ТС, проявляемые на разных масштабных уровнях

Масштабный уровень	Индивидуальные свойства	Контактные свойства
макро	плотность, вязкость, поверхностное натяжение, pH и электропроводность (для водных растворов), диэлектрическая постоянная, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность	краевой угол смачивания, растекаемость, коэффициент теплопередачи, толщина исходной смазочной пленки
мезо	испаряемость, растворимость газов, пьезокоэффициент вязкости, термостабильность, химический потенциал	микрокапиллярные свойства, работа адгезии, адсорбционная и хемисорбционная активность, энергия активации образования химически модифицированных слоев
нано	дисперсность исходных нанокомпонентов	наноструктура субтонких слоев на границах раздела фаз; энергия активизации наноструктур

Пиромодификаторы трения влияют на процесс термического разложения (пиролиза) компонентов ТС в зоне пластической деформации при ковке или горячей штамповке. Результатом пиролиза является образование значительного количества летучих компонентов, создающих высокое газостатическое противодавление в микрополостях поверхностей штампа (молота) и заготовки. Давление в газовой прослойке из летучих компонентов может достигать до 100 мПА. В этом случае в зоне обработки значительно снижаются нормальные и касательные напряжения и, соответственно, коэффициент пластического трения.

Летучие компоненты пиролиза обладают высокой химической активностью, т.к. являются результатом термодеструкции высокомолекулярных цепей. Они мгновенно адсорбируются на свежевскрытых в результате трения микроучастках контактирующих поверхностей с образованием защитного слоя.

Образующийся в процессе пиролиза твердый коксообразный осадок может играть роль твердосмазочной пленки, экранирующей рабочую поверхность штампа (молота). На процесс образования твердой коксообразной пленки при пиролизе ТС влияет природа металлических контактирующих поверхностей. По активности к пленкообразованию металлы располагаются в следующий ряд: *Fe>Ni>Ti>Zr>Cu>W*. Теперь понятно, почему штамповка нержавеющих сталей, содержащих в своем составе значительное количество хрома, сопровождается высоким износом штампа и низкой эффективностью типовых ТС.

В качестве пиромодификатора трения предложено использовать микроцеллюлозу МКЦ-1 и техническую целлюлозу различных марок.

Лабораторные испытания пиролитической активности микроцеллюлозы МКЦ-1 показали, что добавление ее в синтетические растворы и в эмульсии (через эмульсол) в виде пудры существенно смягчало тяжелые режимы контактного трения. На 40% увеличивалась несущая способность смазочного слоя, на 80% - его предельная прочность. Индекс задира возрастает на 14%. Антифрикционные свойства композиций при добавлении 2% микроцеллюлозы МКЦ-1 изменяются незначительно. Оптимальный результат достигнут при традиционном использовании в составе типовой эмульсии традиционной антифрикционной присадки – коллоидного графита (2%) с микроцеллюлозой (2%). Здесь наблюдался очевидный синергетический эффект между компонентами.

Следующая группа модификаторов трения – наномодификаторы, использование которых обусловлено достижениями нанотехнологий. Наномодификаторы успешно используют в качестве компонентов моторных и трансмисионных масел. Можно предположить о положительном влиянии ТС, облагороженных нанопродуктами, и в процессах горячей штамповки.

К специфическим особенностям нанопродуктов относится их малая дисперсность, определяющая их высокую химическую и реакционную активность. Наночастицы могут играть роль катализаторов уникальных химических реакций, протекающих со сверхвысокими скоростями. Это качество придает наноматериалам непредсказуемые свойства. В частности, только наноматериалы обладают в определенных условиях способностью к самоорганизации, т.е. к коллективному поведению атомов с образованием упорядоченных структур [4].

Практический интерес представляют нанокластерные углеродные мактериалы, к которым относятся фуллерены, фуллереновая сажа и фуллереновая чернь, углеродные нанотрубки, нановолокна и т.д.

Основой большинства технических наноматериалов являются фуллерены, представляющие

собой новую форму углерода. Наиболее распространенным среди фуллеренов является фуллерен C_{60} , который представляет собой молекулу из 60 атомов углерода, образующих замкнутую сферическую поверхность, составленную из правильных шести- и пятиугольников. Главной особенностью фуллеренов является их повышеная реакционная активность. Они легко захватывают атомы других веществ и образуют материалы с принципиально новыми свойствами.

Учитывая высокую стоимость фуллерена C_{60}, промышленный выпуск которого освоен в России, в качестве наномодификаторов ТС, для горячей штамповки испытывались фуллереновая сажа (ФС) и фуллереновая чернь (ФЧ). Для подтверждения концепции о необходимости ингибировать трение и износ на всех трех масштабных уровнях испытан комплекс присадок к маслу ИС-12. Масло легировалось наномодификаторами, а также традиционными присадками: графит, дисульфид молибдена, хлорпарафин и диалкилдитиофосфат цинка (ДФ-11).

Результаты трибологических и стендовых испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Испытания наносодержащих смазочных компонентов

№ п/п	Смазочная композиция	Трибологические характеристики			
		$P_к$, Н	$P_с$, Н	Диаметр пятна износа, мм	Коэффициент трения
1	Водная дисперсия графита – 3% Аэрозольное распыление	220	310	5,2	0,38
2	Водная дисперсия ФС – 3% Аэрозольное распыление	280	450	4,6	0,32
3	Водная дисперсия ФЧ – 3% Аэрозольное распыление	270	420	4,7	0,32
4	Водная дисперсия ФЧ (2%) и графита (3%) Аэрозольное распыление	310	480	4,1	0,28
5	Масло ИС–20 +5% MoS_2	450	730	3,7	0,28
6	Масло ИС–20 +5% графита	410	640	3,9	0,32
7	Масло ИС–20 +3% ФС	630	920	2,8	0,22
8	Масло ИС–20 +3% ФЧ	600	990	2,9	0,24
9	Масло ИС–20 +3% ФЧ + 3% MoS_2	710	1100	1,7	0,18
10	Масло ИС–20 +3% ФЧ + 3% MoS_2 +2% хлорпарафина + 2% ДФ–11	780	1220	1,5	0,12

Из таблицы следует, что фуллереновая чернь незначительно уступает по трибологической эффективности фуллереновой саже. А комбинация фуллереновой черни с дисульфидом молибдена значительно превосходит по $P_к$ и $P_с$ показатели масла, содержащего только фуллереновую сажу. Наибольшее влияние наноуглероды оказывают на нагрузку сваривания. Добавка ФС и ФЧ буквально «обрывает» схватывание шаров. Противозадирная эффективность масел, легированных наноуглеродами, почти вдвое превышает противозадирную активность с графитом и на 80% выше, чем у масел с добавками дисульфида молибдена.

В водных дисперсиях наноуглероды не оказали заметного влияния на коэффициент трения (за исключением композиции ФЧ+графит), но существенно повысили нагрузку сваривания. Противоизносные свойства композиций заметно улучшаются при переходе от традиционных ламеллярных добавок к наноуглеродам. ФС ФЧ в водных дисперсиях примерно равноценны.

Если учесть, что ФЧ заметно дешевле, чем ФС, то она может считаться на сегодняшний день и более перспективным модификатором трения. Композиция из дисульфида молибдена, фуллереновой сажи, хлорпарафина и сложного фосфата обеспечила максимальную эффективность в жестких режимах граничного трения. Эта композиция может явиться основой для разработки серии инновационных технологических смазок.

Учитывая, что порошки ФС и ФЧ нестабильны и склонны к слипанию. предложено использовать их в микрокапсульной форме. При проведении промышленных испытаний микрокапсулы изготавливались методом разделения фаз в желатиновой оболочке диаметром 300-500 мкм. Дисперсия из микрокапсул легко распыляется обычным аэрозольным аппаратом. Микрокапсулирование позволяет экономить до 30 % наноуглеродных материалов.

Список литературы

1. *Бердичевский, Е.Г.* Трение и смазка при пластической обработке металлов: монография/ Е.Г.Бердичевский; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2011. – 183с.

2. *Погодаев Л.И.* Структурно-энергетические модели надежности материалов и детали машин/Л.И. Погодаев, В.И. Кузьмин. – СПб.: АТРФ, 2006. - 608 с.

3. *Бердичевский Е.Г.* Модификаторы трения как основа смазочных композиций для металлообработки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2010. - №5. С.43-46.

4. *Бокарев Д.А.* Высокооэффективные модификаторы трения на основе наноразмерных материалов / Д.А. Бокарев, В.Н. Бакунин, Г.Р. Кузьмин, О.П. Паренаго//Химия и технология топлив и масел, 2004. - №4. С.28-30.

INNOVATIVE TECHNOLOGICAL LUBRICAL IN HOT METAL WORKING PROCESSES

Berdichevskiy E. G.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, B.Sankt Petersburg ul., D . 41, Veliky Novgorod, 173003, e-mail*:* popim@yandex.ru

Abstract: The ways of the development of innovative technological processes for forging lubricants and hot stamping. Emphasis is placed on the use of friction modifiers to the base liquid foundation. As modifiers offered piromodifikatory and nanomodifiers. It is shown that the efficiency of tribological and pyro- nanomodifiers, especially when using a synergistic interaction between the components.

Keywords: lubrication technology, tribology, friction modifiers, nanomaterials, hot stamping, pyrolysis lubricants.

УДК 620.179.14

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ В МАШИНОСТРОЕНИИ: ОТ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ К МЕХАНИКЕ НАСЛЕДОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУР

В. Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН, доктор техн. наук, профессор (КузГТУ, г. Кемерово)

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28
blumenstein@rambler.ru

Аннотация: Представлены ключевые положения механики технологического наследования. Показана эволюция научных представлений о наследственности в машиностроении.

Ключевые слова: механика технологического наследования, очаг деформации, степень деформации сдвига, показатель схемы напряженного состояния, запас пластичности.

Технологическая наследственность – одна из ключевых областей научных исследований в машиностроении, которые проводятся с 30-х гг. 20-го века.

А.П. Соколовский, анализируя точность обработки деталей на металлорежущих станках, обнаружил копирование погрешностей по ходу технологического процесса [1]. В.М. Кован предложил проводить размерный анализ от конечной (сборка) к начальной (заготовка) стадиям производства [2]. В этот период носителем наследственной информации являлась изготавливаемая деталь, точностные параметры которой «копировались» (наследовались) по ходу технологического процесса.

К началу 60-х годов существенно возросли требования к надежности деталей машин, что потребовало нового подхода к оценке технологических процессов. П.И. Ящерицын, 100-летие которого в 2015 году отмечает научно-педагогическая общественность, выполнив комплекс исследований точности и качества поверхностного слоя (ПС) деталей подшипников, обосновывает необходимость рассмотрения свойств обработанных поверхностей в зависимости от всей совокупности выполняемых операций [3]. Совместно с Э.В. Рыжовым и В.И. Аверченковым показано, что в технологическом процессе существуют своеобразные «барьеры», являющиеся препятствием для некоторых параметров, описывающих поверхностный слой изделия [4]. При этом выделяют положительные и отрицательные факторы технологической наследственности; при проектировании технологических процессов в структуру следует вводить операции, которые создавали бы больше препятствий к прохождению к финишной операции отрицательных факторов.

А.М. Дальский показал роль наследственности в обеспечении надежности высокоточных деталей машин [5]. Совместно с А.С. Васильевым и А.И. Кондаковым получены новые знания о технологических средах [6]. Установлены основные формы наследования, проявляющиеся в технологических средах различных уровней: параметрическое, структурное и наследование характеристик взаимодействия выделенного объекта (заготовки) с внешней средой. Превалирует мнение о том, что носителем наследственной информации является тонкий поверхностный слой, формирующийся на всем протяжении технологического процесса.

А.Г. Суслов технологическую наследственность представляет различными вариантами структурных моделей [7].

Автором данной работы разработаны научные представления механики технологического наследования на основе оценки накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности в очагах пластической деформации в условиях изменяющейся схемы напряженно-деформированного состояния [8].

Ключевыми элементами механики технологического наследования (ТН) являются:

1. Процессы резания, поверхностного пластического деформирования (ППД) и последующего эксплуатационного усталостного нагружения рассматриваются при использовании единой методологии – накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности.
2. Процессы нагружения рассматриваются в режиме online.
3. Физическое состояние поверхностного слоя определяется как результат пластического течения металла в очаге деформации, протекающего в условиях сложного напряженно-деформированного состояния.
4. Непрерывное накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности металла в по-

верхностном слое детали рассматривается под влиянием программ нагружения.

5. Модели механики процессов резания; усталостного нагружения до момента полного исчерпания запаса пластичности; усталостного нагружения с развитием трещины.

6. Сквозные аналитические расчеты накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности по стадиям ЖЦИ.

7. Носителем наследственной информации является материал очага деформации, в котором происходит пластическое течение металла.

8. ТН характеризуется накопленными деформациями и исчерпанным и остаточным запасом пластичности материала детали.

Для решения задач механики ТН используются известные из механики деформируемого твердого тела параметры, как:

- показатель схемы напряженного состояния:

$$\Pi = \frac{\sigma}{\mathrm{T}} = \frac{1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{1/\sqrt{6}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}};$$

- степень деформации сдвига:

$$\Lambda = \langle \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^t \sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(\xi_x - \xi_y\right)^2 + \left(\xi_y - \xi_z\right)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2\right] + \frac{3}{4}\left(\eta_{xy}^2 + \eta_{yz}^2 + \eta_{zx}^2\right)} \rangle \, dt;$$

- тензор остаточных напряжений:

$$[\mathrm{T}\sigma_{\text{ост}}]_{ij} = \left[\mathrm{T}\sigma_{\text{деф}}\right]_{ij} + \left[\mathrm{T}\sigma_{\text{раз}}\right]_{ij} + [\mathrm{T}\sigma_t]_{ij};$$

- степень исчерпания запаса пластичности:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 = \Psi_1 + (\Psi_{21} + \Psi_{22}) = n\varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_i^{n-1} d\Lambda + \left(\int_0^{\Lambda_k} \frac{d\Lambda}{\Lambda_p} - \varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_p^{n-1} d\Lambda \right),$$

где σ – среднее нормальное напряжение; T – интенсивность касательных напряжений; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные компоненты тензора напряжений; $\xi_x, \xi_y, \xi_z, \eta_{xy}, \eta_{yz}, \eta_{zx}$ – компоненты тензора скоростей деформаций; $\left[\mathrm{T}\sigma_{\text{деф}}\right]_{ij}$ – тензор напряжений нагрузки; $\left[\mathrm{T}\sigma_{\text{раз}}\right]_{ij}$ – тензор напряжений разгрузки; $[\mathrm{T}\sigma_t]_{ij}$ – тензор тепловых напряжений; Ψ_1 – составляющая, зависящая от напряжения текучести или от накопленной деформации; Ψ_2 – составляющая, зависящая от пластичности металла в условиях $\Pi = const$; Λ и Λ_p – накопленная и предельная степень деформации сдвига при данном показателе схемы напряженного состояния Π; n – коэффициент деформационного упрочнения; φ_0 – коэффициент, определяемый на основе испытаний на пластичность. В неупрочненном металле $\Psi = 0$, а при полном исчерпании запаса пластичности $\Psi = 1$.

В общем виде положения механики технологического наследования могут быть представлены схемой формирования поверхностного слоя, представленной на рис. 1. Жизненный цикл представлен стадиями резания, поверхностного пластического деформирования и усталостного нагружения, состоящего, в свою очередь, из двух стадий – циклической долговечности и циклической трещиностойкости.

При решении задач механики в качестве исходных характеристик металла используется кривая упрочнения $\sigma_s = \sigma_s(\Lambda)$, кривая предельной пластичности $\Lambda_p = \Lambda_p(\Pi)$ и диаграмма циклической трещиностойкости $V = V(K)$ в координатах «коэффициент интенсивности напряжений K – скорость роста усталостной трещины V».

Внедрение и перемещение инструмента на стадии резания приводит к возникновению очага деформации (ОД), в котором происходит течение металла, приводящее к накоплению деформаций $\Lambda_{\text{рез}}$, исчерпанию запаса пластичности $\Psi_{\text{рез}}$ и формированию поверхностного слоя. Последующее нагружение на стадии ППД приводит к возникновению очага деформации, зависящего от истории нагружения, и означает продолжение деформационных процессов.

Следствием этого является формирование поверхностного слоя с накопленной за две стадии деформацией $\Lambda_{\text{рез}} + \Lambda_{\text{ППД}}$ и исчерпанным запасом пластичности $\Psi_{\text{рез}} + \Psi_{\text{ППД}}$. Тензор остаточных напряжений сформирован также с учетом истории нагружения.

В процессе циклического нагружения накопление деформаций продолжается до предельного уровня Λ_p, которому соответствует степень исчерпания запаса пластичности $\Psi = 1$. Этому моменту соответствует зарождение начальной

трещины и окончание стадии циклической долговечности.

Дальнейшее развитие трещины описывается в категориях диаграмм циклической трещиностойкости.

Таким образом, в 60-е–90-е годы ТН является одним из ключевых инструментов получения новых знаний о формировании качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин, что позволило в существенной мере повысить качество машиностроительных изделий.

К началу 2000-х годов становится очевидным, что традиционный макро- и микроинструментарий исследований качества поверхностного слоя в наследственной постановке исчерпал себя; это существенно затрудняло получать новые знания и закономерности поведения металла под нагрузкой. Появление новых тонких физических методов и средств исследований позволило получить новые результаты на наноразмерном уровне.

В настоящее время актуальны исследования в области физики металлов и кристаллографии, позволяющие получать уникальные знания, развивать эволюционные представления о кристаллических структурах материалов.

Важнейшие достижения в этой области демонстрирует А.Р. Оганов, например, [9]. Автор разработал и использует эволюционный, а, по мнению рядя физиков, революционный алгоритм для прогнозирования и формирования новых уникальных структур кристаллов. Согласно алгоритму, кристаллическая структура оценивается с позиций энергетического состояния; расчет позволяет найти наиболее выгодную низкую энергетическую область с устойчивой структурой. Используя терминологию и подходы из биологической эволюции, «производит детей из родителей, путем использования либо законов наследственности, либо разного рода мутаций».

Приведем еще один пример создания наномашин с использованием методов молекулярного моделирования [10].

На современном этапе развития научных знаний только такие подходы позволяет получать принципиально новые знания и закономерности и использовать их для создания новых уникальных материалов, технологий и изделий.

Безусловно, это требует смены образовательной парадигмы в системе высшего профессионального образования при подготовке кадров для машиностроения; ключевое внимание должно уделяться базовым научным дисциплинам: физике металлов, кристаллографии и др.

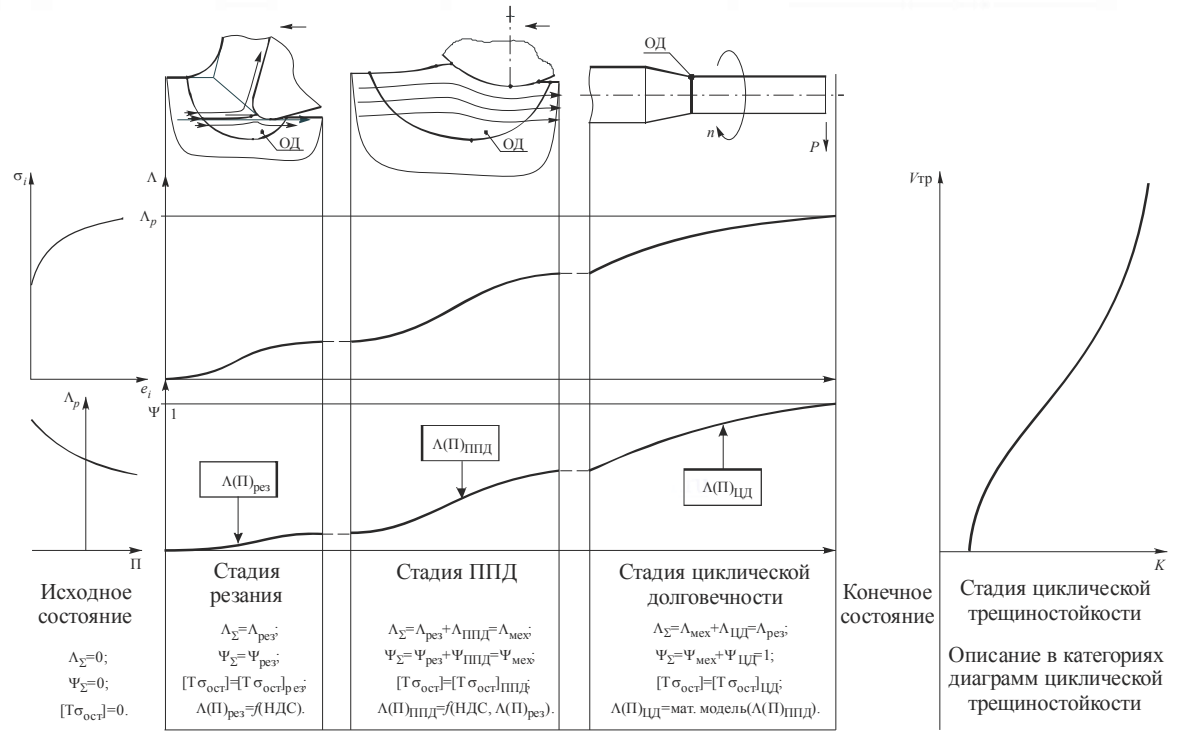


Рисунок 1 – Схема формирования поверхностного слоя в категориях механики технологического наследования

Список литературы

1. *Соколовский, А. П.* Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машгиз, 1955. – 515 с.

2. *Кован, В. М.* Расчет припусков на обработку в машиностроении. – М.: Машгиз, 1953. – 208 с.

3. *Ящерицын, П. И.* Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства деталей. – Минск: Наука и техника, 1971. – 210 с.

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

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

6. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др.; Под ред. А.М. Дальского. М.: Изд-во МАИ, 2000. 364 с.

7. *Суслов, А. Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

8. *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.

9. *Qiang Zhu*, *Artem R. Oganov, Colin W. Glass, Harold T. Stokes.* Constrained evolutionary algorithm for structure prediction of molecular crystals: methodology and Applications // Acta Crystallographica, Section B, Structural Science. Acta Cryst. (2012). B68, P. 215–226.

10. *Rieth, M.* Series on the Foundations of Natural Science and Technology – Vol. 6. NANO-ENGINEERING IN SCIENCE AND TECHNOLOGY. An Introduction to the World of Nano-Design. – Singapore, 2003. – 160 pp.

TECHNOLOGICAL INHERITANCE IN MECHANICAL ENGINEERING FROM THE QUALITY OF THE SURFACE LAYER TO THE MECHANICS OF INHERITANCE AND EVOLUTION OF STRUCTURES

Blumenstein V. Yu., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: blumenstein@rambler.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650026, Russian Federation

Abstract: The key provisions of the mechanics of the process of succession. Shown Evo-lution of scientific concepts of heredity in mechanical engineering.

Keywords: technological mechanics of inheritance, the deformation zone, the degree of shear strain rate stress pattern, the stock of plasticity.

УДК 629.78

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА Н13М5Х4ФСТЮ, ЛЕГИРОВАННОГО СОЕДИНЕНИЯМИ БОРА

Е. Н. ЕРЕМИН, доктор техн. наук, профессор
А. С. ЛОСЕВ,
С. А. БОРОДИХИН,
А. Е. МАТАЛАСОВА
(ОмГТУ, г. Омск)

644050, г. Омск, пр. Мира 11, Омский государственный технический университет,
weld_techn@mail.ru

Аннотация. Наплавочные материалы с эффектом вторичного твердения по эксплуатационным свойствам значительно превосходят инструментальных теплостойкие стали, но в большинстве случаев данные материалы легированы дефицитными дорогостоящими элементами кобальтом и вольфрамом. С целью исключения дорогостоящих элементов кобальта и вольфрама из состава наплавочных материалов приведены результаты исследования структуры и механических свойств металла наплавленного порошковой проволокой Н13М5Х4СФТЮ, в состав которой введены карбид бора, диборид титана и диборид циркония в количестве 2,5%. Установлено, что введение боридов в мартенситно-стареющую сталь Н13Х4М5ФСТЮ позволяет повысить её прочность после старения в 1,5 раза, что соответствует уровню высокопрочных сталей, при незначительном уменьшении ударной вязкости. Кроме этого, присутствие боридов в наплавленном металле затрудняет диффузионный обмен, рекристаллизацию и коагуляцию дисперсных частиц, и тем самым повышает его термическую стабильность.

Ключевые слова: наплавленный металл; мартенситно-стареющая сталь; бориды; прочность.

Введение. Изготовление деталей методами горячей пластической деформации получило широкое распространение в крупносерийном и массовом производстве. С усложнением условий деформирования, в частности, в связи с более широким применением выдавливания, накатки и вырубки более твёрдых металлов, а также вытяжки с большой скоростью, протекающей в условиях повышенных давлений и нагрева, значительно возросли требования, предъявляемые к работоспособности штампового инструмента [1].

В настоящее время наиболее технологичным способом повышения работоспособности штампового инструмента является восстановительная наплавка с применением материалов, обеспечивающих получение наплавленного металла с эффектом вторичного твердения (мартенситно-стареющие и дисперсионно-твердеющие стали) [2]. Наплавочные материалы с эффектом вторичного твердения по эксплуатационным свойствам значительно превосходят инструментальных теплостойкие стали, но в большинстве случаев данные материалы легированы дефицитными дорогостоящими элементами (кобальтом, вольфрамом), общее содержание которых достигает 20%, что обусловливает их высокую стоимость и ограничивает их применение [3].

В связи с выше изложенным, в работе с целью исключения остродефицитных, дорогостоящих элементов (W и Co) из состава наплавочных материалов с интерметаллидным упрочнением исследовали влияние тугоплавких соединений бора (B_4C, TiB_2, CrB_2) на свойства мартенситно-стареющей стали Н13М5Х4ФСТЮ.

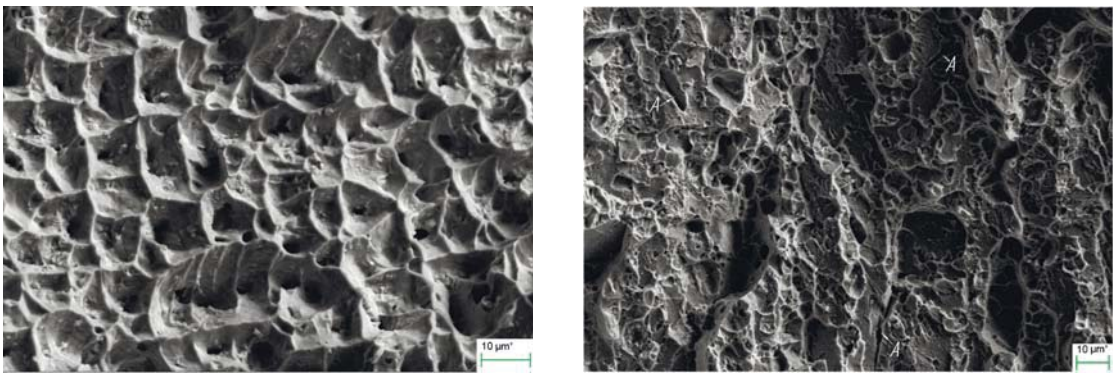
Методики проведения исследований. Наплавленный металл получали порошковой проволокой Н13М5Х4ФСТЮ, в состав которой дополнительно были введены бориды (B_4C, TiB_2, CrB_2) в количестве 2,5% [4]. Наплавку проводили в аргоне опытной порошковой проволокой диаметром 2,4 мм в 3 слоя на пластины из стали Ст3 размером 200 × 50× 10 мм без предварительного подогрева. Режим наплавки: сила тока 230 А; напряжение дуги 24 В; скорость наплавки 20 м/ч.

Механические испытания на растяжение проводили при комнатной температуре на машине Instron-3369 со скоростью 1 мм/мин на образцах с рабочим диаметром 5 мм и длиной 25 мм. Ударную вязкость наплавленного металла (KCU) определяли на образцах в соответствии с ГОСТом 9454-78 на маятниковом копре Metro Com 06103300. Поверхность разрушения наплавленного металла исследовали с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP.Дюрометрические испытания проводили с помощью твердомеров Shimadzu HMV-2 (нагрузка P = 200 г) и ТК-2.

Критерием теплостойкости наплавного металла, принимали отношение твердости металла после отпуска при температурах 550, 650, 750 и 825 °С к твердости после термической обработки на оптимальное упрочнение: после наплавки и старения при 500 °С в течение 2 часов.

Металлографические исследования наплавленного металла проводили на оптическом микроскопе Carl Zeiss AxioObserver A1m. Микроструктура выявлялась химическим травлением в реактиве состава: $CuSO_4$ – 4 г; HCl – 20 мл; H_2O – 20 мл. Электронно-микроскопические исследования осуществляли на фольгах с использованием просвечивающих электронных микроскопов ЭМВ-100Л и JEM-2100 «JEOL» с энергодисперсионным анализатором Inca-250.

Результаты исследований и их обсуждение. Проведенные механические испытания показали, что в состоянии после наплавки металл Н13М5Х4ФСТЮ без боридов имеет высокие показатели прочности ($\sigma_{0,2}$ = 940 МПа, $\sigma_в$ = 1080 МПа, 385÷410 HV) при значении ударной вязкости KCU 1,53 МДж/м^2. Изучение фрактограммы излома показало вязкий механизм разрушения, осуществляющийся путем зарождения, роста и слияния микропор, оставляющих позади себя на поверхности разрушения «чашечный узор» (рис. 1, а).

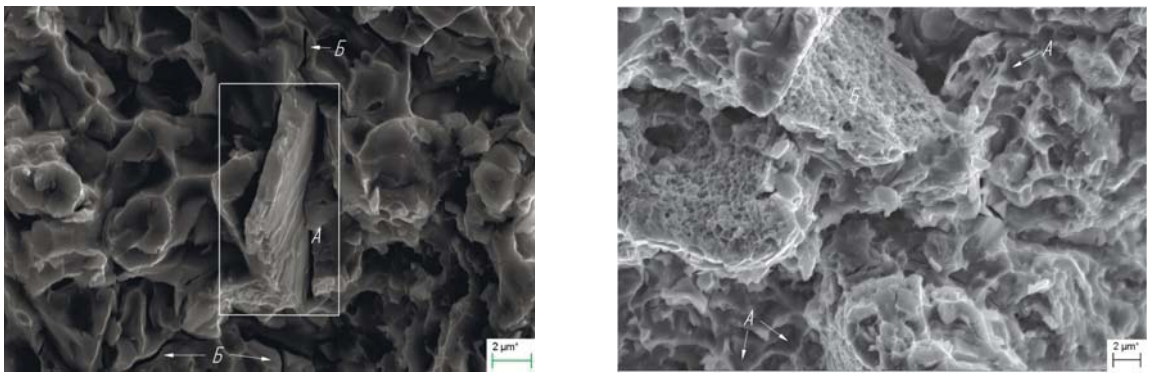


а) б)

Рисунок 1 – Изломы наплавленного металла Н13М5Х4ФСТЮ: после наплавки (а), после старения при 500 °С, 2 ч. (б)

Старение данного металла при 500 °С, 2 ч. приводит к значительному приросту прочности ($\sigma_{0,2}$ = 1780 МПа, $\sigma_в$ = 1830 МПа, 510÷524 HV) и снижению ударной вязкости KCU до 0,62 МДж/м^2. При изучении фрактограммы излома видно, что разрушение происходит по механизму образования и слияния микропор, в результате поверхность разрушения покрыта множеством ямок в широком диапазоне размеров, наложенных на сетку межзеренных фасеток (рис 1, б). Так же на поверхности разрушения имеется множество небольших по размерам вторичных межзеренных трещин (рис. 1, б, точки А).

Наплавленный металл Н13М5Х4ФСТЮ с боридами в состоянии после наплавки имеет более высокие показатели прочности ($\sigma_{0,2}$ = 1270 МПа, $\sigma_в$ = 1320 МПа, 476÷496 HV) при значении ударной вязкости KCU 0,84 МДж/м^2. При изучении фрактограммы излома видно, что поверхность разрушения покрыта множеством ямок, которые зародились на границе раздела между матрицей и частицами карбоборидов (рис. 2, а). Так же на поверхности разрушения имеется участок хрупкого разрушения (рис. 2, а, участок А) от которого в разные стороны отходят не большие по размерам вторичных трещин (рис. 2, а, точки Б).



а) б)

Рисунок 2 – Изломы наплавленного металла Н13М5Х4ФСТЮ с боридами: после наплавки (а), после старения при 500 °С, 2 ч. (б)

Старение металла Н13М5Х4ФСТЮ с боридами при 500 °С, 2 ч. сопровождается такими же изменениями механических характеристик ($\sigma_{0,2}$ = 2550 МПа, $\sigma_в$ = 2610 МПа, 694÷719 HV) при значении ударной вязкости KCU 0,41 МДж/м^2, как и у обычных мартенситно-стареющих сталей. При изучении фрактограммы излома видно, что на поверхности образца ясно видны фасетки квазискола (рис. 2, б), соединенные между собой гребнями отрыва и неглубокими ямками (рис 2, б, точки А). Так же на поверхности разрушения образца присутствуют участки вязкого разрушения, осуществленные путем слияния микропор (рис 2, б, участок Б).

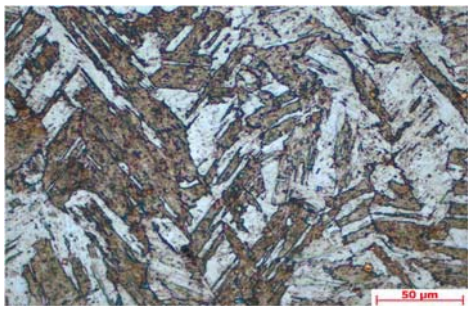
Испытания на теплостойкость показали, приведенные в таблице, что твердость наплавленного металла Н13М5Х4ФСТЮ без боридов после отпуска при температуре 550, 650, 750 и 825 °С снижается на 7-9 %; 18-22 %, 31-34 % и 38-42 %, а с боридами на 2-3 %; 9-11 %, 17-20 % и 21-24 % соответственно. Таким образом, теплостойкость наплавленного металла Н13М5Х4ФСТЮ от введения соединений бора в интервале температур 550…825 °С повысилась в 1,08 – 1,28 раза.

Таблица – Результаты испытаний наплавленного металла на теплостойкость

Наплавленный металл Н13М5Х4ФСТЮ	Твердость металл HRC после отпуска при температуре, °С			
	550	650	750	825
Без боридов	46	40	34	30
С боридами	55	50	46	43
Наплавленный металл Н13М5Х4ФСТЮ	Степень разупрочнения			
	$\frac{HRC\ 550\ ^0C}{HRC\ 500\ ^0C}$	$\frac{HRC\ 650\ ^0C}{HRC\ 500\ ^0C}$	$\frac{HRC\ 750\ ^0C}{HRC\ 500\ ^0C}$	$\frac{HRC\ 825\ ^0C}{HRC\ 500\ ^0C}$
Без боридов	0,92	0,80	0,68	0,6
С боридами	0,98	0,89	0,82	0,77

Для выявления таких различий значений прочности и теплостойкости наплавленного металла Н13М5Х4ФСТЮ без боридов и с ними проведены металлографические и электронно-микроскопические исследования по выявлению природы образующихся упрочняющих фаз.

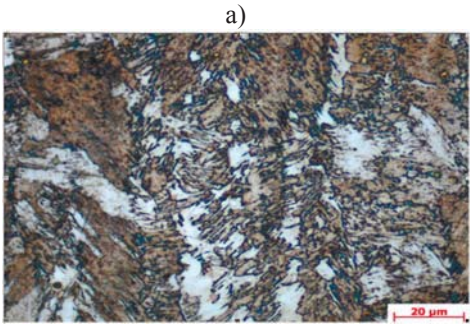
Проведенные исследования показали, что в состоянии после наплавки металл стали Н13М5Х4ФСТЮ без боридов представляет собой пересыщенный легирующими элементами α-твердый раствор со структурой мартенсита (рис. 3, а). Период решетки структуры составил 0,2875 нм, а плотность дислокаций составила 11,2·10^{14} м$^{-2}$. Признаков присутствия остаточного аустенита и упрочняющих фаз не обнаружено (рис. 3, б).



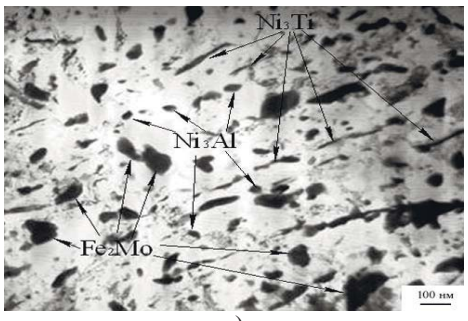
а)



б)



в)

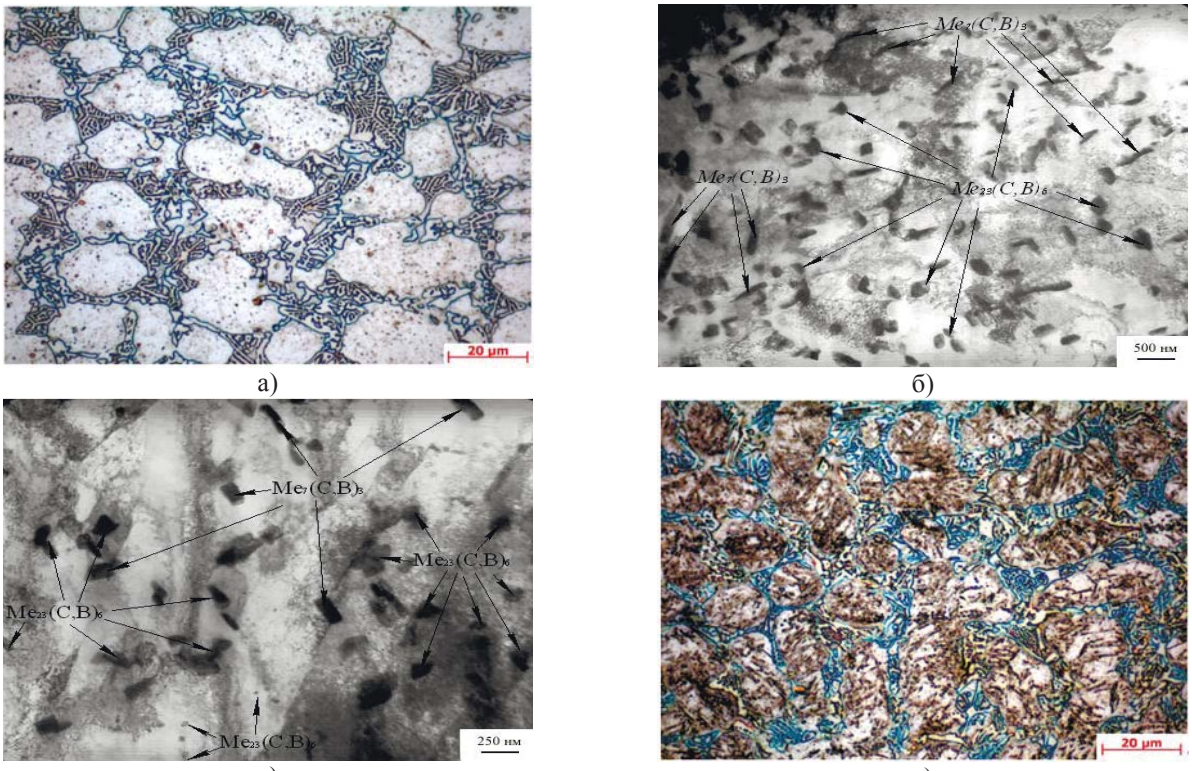


г)

Рисунок 3 – Микроструктура и тонкая структура наплавленного металла Н13М5Х4ФСТЮ: после наплавки (а, б); после старения при 500 °С, 2 ч. (в) интерметаллидные упрочняющие фазы (г)

Старение при 500 °С, 2 ч. не приводит к существенным видимым изменениям структуры стали Н13М5Х4ФСТЮ (рис 3, в). При этом наблюдается прирост твердости на 140 HV, период решетки структуры уменьшается до 0,2871 нм, а плотность дислокаций снижается до $8{,}2\cdot10^{14}$ м$^{-2}$. Такие изменения можно объяснить, тем что при 500 °С происходит обеднение α-твердого раствора легирующими элементами с образованием интерметаллидных фаз размерами от 4 до 50 нм. Для идентификации типа упрочняющих фаз производили перестаривание мартенситно-стареющей стали при 700 °С, 1 ч. Установлено (рис. 3, г), что упрочнение стали Н13М5Х4ФСТЮ без боридов после старения происходит за счет образования интерметаллидных фаз Ni_3Ti, Ni_3Al и Fe_2Mo, имеющих соответственно игольчатую, сферическую и чечевицеобразную формы [5].

Сталь Н13М5Х4ФСТЮ с боридами в состоянии после отливки представляет собой пересыщенный легирующими элементами α-твердый раствор с грубой карбоборидной эвтектикой, имеющей скелетный характер, так называемой эвтектики ванадиевого типа (рис. 4, а). Эвтектика образована на базе карбоборида $Me_3(C,B)$ следующего состава: Fe = 47 – 62%, Cr = 7 – 9%, V = 5 – 7%, Ni = 3 – 7%, Ti = 5 – 16%, Mo = 12 – 17%. Период решетки структуры стали составил 0,2881 нм, а плотность дислокаций $9{,}8\cdot10^{14}$ м$^{-2}$. Кроме этого обнаружены карбобориды круглой формы типа $Me_{23}(C,B)_6$ размером ~ 184 нм на основе Ti = 67 – 72%, V = 4 – 7%, Fe = 2 – 45, Mo = 14 – 19% и пластинчатой формы типы $Me_7(C,B)_3$ (средняя длина 486 , толщина 53 нм) на основе Ti = 55 – 60%, V = 6 – 8%, Cr = 2 – 4%, Fe = 8 – 11%, Mo = 17 – 22% (рис. 4, б). Присутствие остаточного аустенита не обнаружено.



а) б) в) г)

Рисунок 4 – Микроструктура и тонкая структура наплавленного металла 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами: после наплавки (а, б); после старения при 500 °С, 2 ч. (в, г)

Старение стали Н13М5Х4ФСТЮ с боридами при 500 °С, 2 ч., также приводит к уменьшением периода решетки структуры до 0,2873 нм и плотности дислокаций до $7{,}4\cdot10^{14}$ м$^{-2}$. Однако прирост твердости составляет 220 HV, что значительно больше, чем у мартенситно-стареющей стали без боридов [6]. Такой прирост твердости можно объяснить не только образованием в процессе старения стали мелкодисперсных интерметаллидных фаз с размерами от 6 до 42 нм, но также и выделением высокопрочных труднорастворимых карбоборидных фаз (рис. 4, в). В результате старения произошло уменьшение размеров карбоборидов как пластинчатой формы типы $Me_7(C,B)_3$ (средняя длина 215 , толщина 47 нм), так и круглой формы типа $Me_{23}(C,B)_6$ до 115 нм, при этом объемная доля карбоборидов типа $Me_{23}(C,B)_6$ существенно увеличилась. Эвтектика в структуре такой стали стала более развитой и замкнутой, при сохранении такого же химического состава, как и после наплавки (рис. 4, г).

Описанные структурные изменения, по-видимому, и обеспечивают существенное повышение прочности и термической стабильности металла упрочненного боридами.

Выводы. Таким образом, введение боридов (B_4C, TiB_2, ZrB_2) в мартенситно-стареющую сталь Н13Х4М5ФСТЮ позволяет повысить её прочность после старения в 1,5 раза, что соответствует уровню высокопрочных сталей, при незначительном уменьшении ударной вязкости. При этом, присутствие боридов в наплавленном металле затрудняет диффузионный обмен, рекристаллизацию и коагуляцию дисперсных частиц, и тем самым повышает его термическую стабильность. Применение данной стали, в качестве наплавочного материала, позволит существенно повысить работоспособность деталей и узлов металлургического оборудования, работающих в условиях циклически изменяющихся динамических нагрузках и высоких температур.

Список литературы

1. *Соколов, Г. Н.* Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей [Текст] / Г. Н. Соколов, В. И. Лысак. – Волгоград : ВолгГТУ, 2005. – 284 с.

2. *Кальянов, В. Н.* Мартенситно-стареющие стали для наплавки штампов [Текст] / В. Н. Кальянов, В. А. Багров // Сварочное производство. – 2003. – №2. – С. 35–37.

3. *Еремин, Е.Н.* Износостойкая наплавка ножей горячей резки металлопроката [Текст] / Е. Н Еремин, Ю. О. Филиппов, Д. Г. Покровский [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 4. – С. 17–19.

4. Патент RU 2429957 от 27.09.2011 г. БИ №27. Порошковая проволока [Текст] / А. С. Лосев, Е. Н. Еремин, В. Ф. Мухин.

5. *Перкас, М. Д.* Высокопрочные мартенситно-стареющие стали [Текст] / М. Д. Перкас, В. М. Кардонский. – М. : Металлургия, 1971. – 224 с.

6. *Еремин, Е. Н.* Влияние боридных соединений на структуру и свойства мартенситно-стареющей штамповой стали, наплавленной порошковой проволокой [Текст] / Е. Н. Еремин, А. С. Лосев // Сварка и диагностика. – 2013. – № 3. – С. 32–35.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF DEPOSITED METAL N13M5H4FSTYU DOPED WITH BORON COMPOUNDS

Eremin, E. N., D.Sc. (Engineering), Professor,
Losev, A. S.,
Borodikhin, S. A.,
Matalasova A. E.

Omsk State Technical University, pr. Mira 11, Omsk, 644050
weld_techn@mail.ru

Abstract. Production of parts by hot plastic deformation is widespread in large scale and mass production. Currently, the most technologically advanced way to improve performance is a replacement die tools surfacing. In order to avoid costly elements of cobalt and tungsten from the surfacing material results of the study of the structure and mechanical properties of the deposited metal flux-cored wire N13M5H4SFTYU, composed of introduced boron carbide, titanium diboride, and zirconium diboride in an amount of 2.5%. The introduction borides maraging steel N13H4M5FSTYU enhances its strength after aging is 1.5 times that corresponds to the high-strength steels. Hardening the obtained deposited metal flux-cored wire obtained N13M5H4FSTYU, unlike conventional maraging steels is due to the release of fine intermetallic and highly durable low solubility carboboride phase $(Ti, Mo, Fe, V)_{23}(C,B)_6$ round and $(Cr, Fe, Mo, Ti)_7(C,B)_3$ lamellar forms. Besides the addition of borides to this metal leads to the formation of carboboride eutectic $(Fe, Ti, Mo)_3(C, B)$ having a skeletal nature and location of the grain boundary. Such structural condition increases the recrystallization temperature and slow diffusion processes at high temperatures, so annealing of the deposited metal to a temperature of 825 ° C has no significant effect on the structure. This flux-cored wire N13M5H4FSTYU with borides recommended coating material to restore and improve the wear resistance of die tooling and parts of metallurgical equipment.

Keywords: deposited metal; maraging steel; boride; hardness.

УДК 621.7.011:621.787:620.179.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМ МЕДЬ-ТИТАН СФОРМИРОВАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕДНОЙ ПОДЛОЖКИ*

В. Г. ШМОРГУН[1],доктор техн. наук, профессор
О. В. СЛАУТИН[1],канд. техн. наук, доцент
Д. А. ЕВСТРОПОВ[1], аспирант
А. О. ТАУБЕ[1], аспирант
В. П. КУЛЕВИЧ[1], студент 4 курса
([1]ВолгГТУ, г. Волгоград, Россия)

Волгоградский государственный технический университет
Просп. Ленина, 28, г. Волгоград, 400131
e-mail: mv@vstu.ru

Аннотация: Показано, что легирование алюминием диффузионной зоны при контактном плавлении на межслойной границе сваренного взрывом медно-титанового композита, приводит к интенсификации диффузионных процессов, увеличению средних значений твердости и износостойкости сформированного интерметаллидного покрытия.

Ключевые слова: куприды титана, сварка взрывом, контактное плавление, микротвердость, износостойкость.

Введение. Медь выделяется среди других металлов высокой тепло- и электропроводностью. Однако, из-за низкой твердости она склонна к износу. Поэтому повышение износостойкости медных деталей является актуальной задачей [1-3]. Один из перспективных методов ее решения - получение интерметаллидного покрытия, обладающего высокими износостойкими свойствами и прочностью сцепления с основой, путем нанесения сваркой взрывом на поверхность меди слоя титана и последующей термической обработки (ТО), в результате которой происходит взаимодействие титана и меди с образованием интерметаллидных соединений [4].

Цель работы: получение многокомпонентных интерметаллидных покрытий системы медь-титан на поверхности меди, изучение их структуры и свойств.

Методика экспериментального исследования: Исходными материалами для исследования служили полученные сваркой взрывом биметаллические соединения медь М1 + титан ВТ1-0 (5+4 мм) и медь М1 + титановый сплав ВТ6 (5+1 мм). Термическую обработку образцов проводили в печи SNOL 8.2/1100 при температуре 870–900 ºС. Металлографические исследования выполняли на модульном металлографическом микроскопе Олимпус ВХ-61. Измерение микротвердости покрытия – на приборе ПМТ-3М с нагрузкой на индентор 50 г. Фазовый состав диффузионной зоны (ДЗ) оценивали при сопоставлении данных, полученных с помощью дифрактометра ДРОН-3 и растрового двухлучевого электронного микроскопа системы Versa 3D. Испытания на износостойкость проводили на экспериментальной установке – аналоге машины Х4-Б (рис. 1). Нагрузка на образец составляла 3,5 Н, путь трения 30 м – абразивная истирающая поверхность - KK19XW шкурка зернистостью 32-Н (по ГОСТ Р 52381-2005). Потерю массы замеряли с точностью до 0,001 на аналитических весах Shinko HTR – 220. Относительную износостойкость полученных покрытий оценивали по формуле:

$$\varepsilon = \Delta G_э / \Delta G_и, \quad (1)$$

где $\Delta G_э$ - потеря массы эталона (медь М1 в отожжённом состоянии), г; $\Delta G_и$ – потеря массы образца с покрытием, г.

Результаты и обсуждение: Металлографический анализ диффузионных зон (ДЗ), полученных при совместной ТО в течение 5 минут образцов ВТ1-0+М1 и ВТ6+М1 при 870, 880 и 900 ºС (рис. 2), показал, что при 870 °С взаимодействие происходит в твердой фазе с образованием слоистой структуры ДЗ. Нагрев до 880 °С в ВТ1-0+М1 приводит к увеличению толщины ранее сформированной ДЗ, а в ВТ6+М1 формируется структура ДЗ, характерная для контактного плавления. При 900 °С контактное плавление наблюдается в обеих композициях, а соотношение скоростей растворения меди и титана в первом приближении подчиняется полученной Саратовкиным Д.Д. зависимости:

$$V_{Cu} / V_{Ti} = C_{Cu} \cdot \rho_{Cu} / C_{Ti} \cdot \rho_{Ti}, \quad (2)$$

где V_{Cu}, V_{Ti} - скорости плавления меди и титана; C_{Cu}, C_{Ti} - весовое или процентное содержание их в эвтектике; ρ_{Cu}, ρ_{Ti} – плотности.

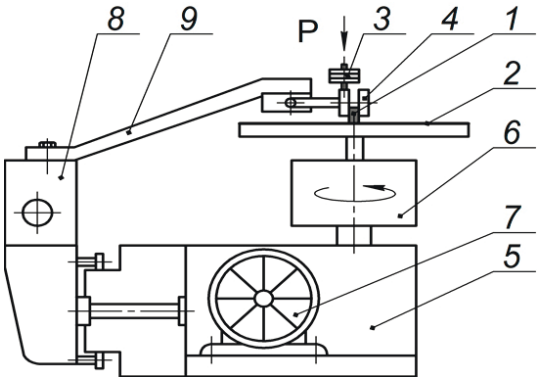


Рисунок 1 – Экспериментальная установка: 1 – образец; 2 – диск с шлифовальной шкуркой; 3 – груз; 4 – зажимное устройство; 5 – станина; 6 – патрон; 7 – электродвигатель; 8 – каретка; 9 – консоль.

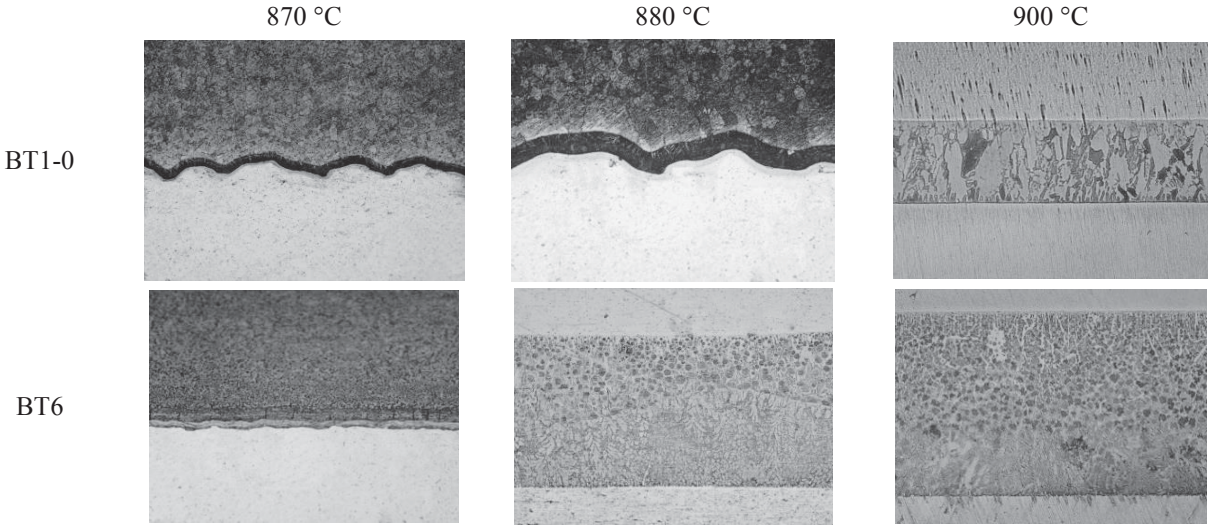


Рисунок 2 – Микроструктуры ДЗ, образующихся на границе титана и его сплавов с медью после термообработки на различных температурах, время выдержки 5 мин (х200).

Более низкая температура начала контактного плавления в образцах ВТ6+М1 приводит к интенсификации диффузионного взаимодействия и получению, при прочих равных условиях, ДЗ (покрытия) большей толщины. Так, например, ТО образцов ВТ1-0+М1 и ВТ6+М1 при 900 °С, 0,5 ч позволила получить покрытия толщиной соответственно 1,0 и 1,4 мм (рис. 3).

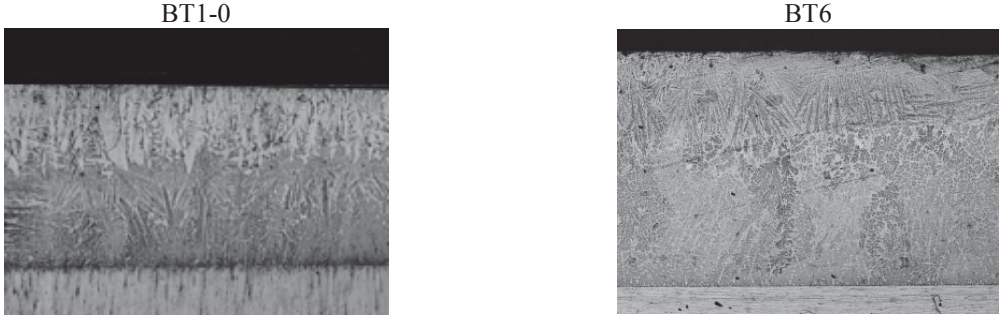


Рисунок 3 – Микроструктуры покрытий, образующихся на поверхности меди после термообработки 900 °С, 0,5 ч (х50).

Анализ результатов точечного энергодисперсионного микроанализа и качественного рентгеноструктурного анализа показал, что структура покрытия, сформированного при использовании образцов ВТ1-0+М1, состоит из смеси твердого раствора титана в меди с

включениями $TiCu_2$, $\beta TiCu_4$ и Ti_3Cu_4. При использовании образцов ВТ6+М1 в структуре сформированного на поверхности меди покрытия, помимо указанных выше фаз, дополнительно обнаружен интерметаллид $TiCu_2Al$. Результатом таких структурных изменений является увеличение средних значений твердости сформированных интерметаллидных покрытий с 4,5 до 5,1 ГПа и относительной износостойкости с 3,38 до 5,73 (таблице).

Таблица – Относительная износостойкость образцов с покрытием

Образец	Режим ТО	Потеря массы эталона (меди), г.	Потеря массы покрытия, г.	Относительная износостойкость, ε
М1+ВТ1-0	900 °С 0,5 ч	0,081	0,024	3,38
М1+ВТ6			0,014	5,73

Выводы:

1. Использование сплава ВТ6 вместо технически чистого титана ВТ1-0 приводит к снижению температуры начала контактного плавления на границе сваренного взрывом медно-титанового композита, интенсификации диффузионных процессов и формированию покрытия большей толщины.

2. Легирование алюминием формирующейся в условиях контактного плавления диффузионной зоны повышает износостойкость покрытия на основе купридов титана за счет увеличения средних значений его твёрдости, обусловленного изменением фазового состава.

Список литературы

1. *Середа Б.П.*, Поверхневе зміцнення матеріалів / Б.П. Середа, Н.Э. Калініна, І.В. Кругляк (Монографія). – Запоріжжя: Вид-во ЗДІА, 2004.-230 с.

2. *Радюк А.Г.*, *Титлянов А.Е., Украинцев А.Е.* Формирование диффузионных слоев на поверхности меди и ее сплавов [текст] / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, А.Е. Украинцев // Цветные металлы. – 2007. – №5. – С. 95–97.

3. Исследование способов повышения жаростойкости меди и свойств медно – алюминиевого диффузионного слоя [текст] / А.Г. Радюк [и др.] // Цветные металлы. – 2009. – №6. – С. 112–113

4. *Шморгун, В.Г.* Фазовый состав диффузионной зоны, сформированной в присутствии жидкой фазы на межслойной границе медно-титанового композита / Шморгун В.Г., Слаутин О.В., Арисова В.Н., Евстропов Д.А., Чешева А.А., Кулевич В.П. // Известия ВолгГТУ. Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении». Вып. 9 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 9 (136). - С. 14-17.

5. Landolt-Bцrnstein Ternary alloy system (Phase diagram, crystallographic and thermodynamic date) // Materials Science and International Team, MSIT – p.156-173.

6. Структура и трибологические свойства покрытий на основе купридов титана / Шморгун В.Г., Артемьев А.А., Антонов А.А., Евстропов Д.А., Бондаренко Ю.И. // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Вып. 10. - Волгоград, 2014. - № 23 (150). - С. 30-32.

** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00418)*

STUDY OF DURABILITY OF INTERMETALLIC TITANIUM-COPPER COATINGS FORMED ON THE SURFACE OF A COPPER SUBSTRATE

Shmorgun V. G.[1], D.Sc. (Engineering), Professor,
Slautin O. V.[1], *PhD* (Engineering), Assistant Professor,
Evstropov D. A.[1], M.Eng. Master of Engineering,
Taube A. O.[1], M.Eng. Master of Engineering,
Kylevich V. P. [1], Fourth-year student

[1]Volgograd State Technical University, Lenina pr. 28, Volgograd, 400131, e-mail: mv@vstu.ru

Abstract: It is shown that alloying the diffusion zone by the aluminum in contact melting at interlayer boundary of explosion welded copper-titanium composite leads to the intensification of diffusion processes, increase the average values of hardness and durability of the formed intermetallic coating.

Keywords: Ti-Cu, explosion welding, contact melting, micro-hardness, durability.

УДК: 621.787.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБКАТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

ФАМ ДАК ФЫОНГ[1,a], *аспирант*
С. А. ЗАЙДЕС[1,b], *доктор технических наук, профессор*

[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
e-mail: [a]dacphuong.ru88@gmail.com, [b]zsa@istu.edu

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) ис-черпаны 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:

$$z = R - \sqrt{R^2 - b^2}, \qquad (1)$$

где R – радиус исходного цилиндра,

b – ширина площадки контакта.

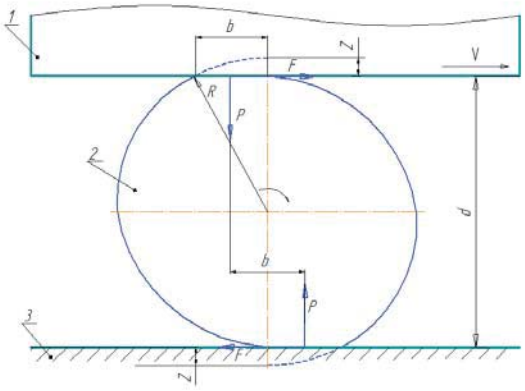


Рисунок 1 – Схема обжатия цилиндра при поперечной обкатке
1 – подвижная плита, 2 – заготовка, 3 – неподвижная плита

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 μ – 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_{∂} – 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:

$$Q = [1 - (1 - 2\mu^2)^2] \cdot 100\%. \quad (8)$$

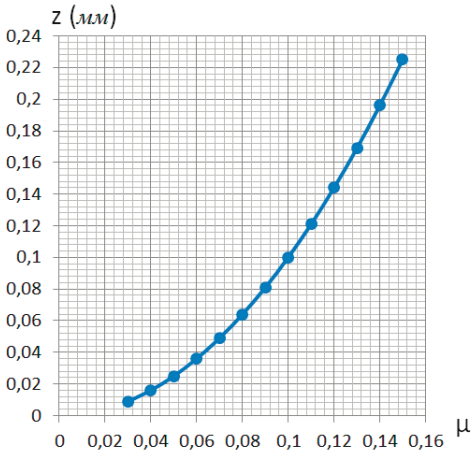


Рисунок 2 – Зависимость предельного абсолютного обжатия от коэффициента трения (цилиндр диаметром 10мм)

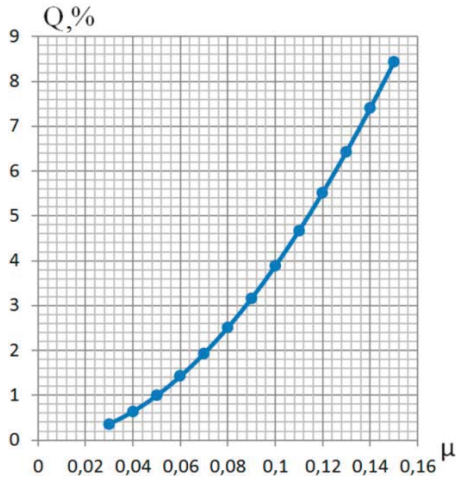


Рисунок 3 – Зависимость предельного относительного обжатия

от коэффициента трения

Значение коэффициента трения для пары сталь-сталь при холодной обкатке находится в пределях 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.

Графики показывает, 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.

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 PARAMETERS OF CYLINDRICAL MACHINE PARTS

Pham Dac Phuong[1], Postgraduate, e-mail: dacphuong.ru88@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: 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 620.178.1

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЕЦИАЛЬНОГО ЧУГУНА ЧМН-35М

Д. А. ГАБЕЦ[1] – аспирант
В. В. КАРГИН[1] – аспирант
Е. О. ЧЕРТОВСКИХ[1]- аспирант
А. М. МАРКОВ[1] – доктор техн. наук, профессор
А. В. ГАБЕЦ[2] – кандидат техн. наук, директор по развитию
([1]АлтГТУ, г. Барнаул, [2] ООО «АСЛЗ», г. Барнаул)

Габец Д. А. - 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
E-mail: gabets22@mail.ru

Аннотация: Рассмотрен вариант модернизации тележки грузового вагона с применением более износостойких материалов. Установлены износостойкие свойства материалов применяемых при конструировании узлов тележки грузового вагона. Разработана новая композиция износостойкого чугуна для отливки деталей тележки грузового вагона. Представлены механические свойства износостойкого чугуна ЧМН-35М, показана микроструктура образцов. Приведены результаты триботехнических испытаний материалов на машине трения, выявлен весовой износ чугуна и стали. По результатам испытаний на износостойкость проведен анализ износа и сделаны выводы.

Ключевые слова: Тележка грузового вагона, колпак скользуна, микроструктура чугуна, пары трения, износостойкий чугун, анализ сплавов
Fe-C, чугун ЧМН-35М, исследование триботехнических свойств.

Введение

Вопрос повышения безопасности движения подвижного состава является актуальным для железнодорожного транспорта, так как это напрямую связано с повышением эффективности работы всей системы перевозок.

Эксплуатация показывает, что существующие материалы тележки грузового вагона не в полной мере обеспечивают безопасную эксплуатацию подвижного состава. Особое значение имеет долговечность для изнашивающихся деталей тележки грузового вагона, так как они работают в условиях интенсивного динамического воздействия. Воздействие динамических сил может привести к хрупким и усталостным разрушениям, а также к преждевременному износу и выходу из строя деталей тележки. Согласно нормативной документации замена изнашиваемых деталей тележки вагона, таких как колпак скользуна выполняют через 160 тыс. км. [1]

Методика экспериментального исследования

Колпак скользуна является тяжелонагруженной сменяемой деталью, устанавливаемой на опору в надрессорной балки тележки грузового вагона. Из опыта эксплуатации грузовых вагонов известно, что износ колпака скользуна при движении на прямых участках и в кривых большого радиуса инициирует самовозбуждение виляния тележки и боковой качки кузова вагона. При критических скоростях движения это негативно влияет на устойчивость и безопасность движения, а в некоторых случаях может приводить и к сходу подвижного состава с путей. Его расположение в тележке модели 18-100 показано на рисунке 1. [2-6]

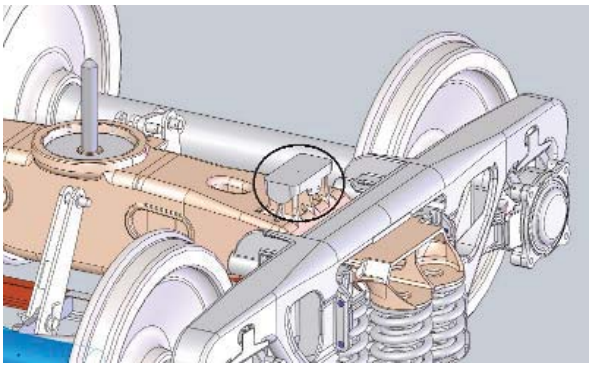


Рисунок 1 – Место установки колпака скользуна на тележке

От физико-механических свойств материала колпака скользуна во многом зависит долговечность и величина межремонтного пробега грузового вагона. Материал колпака должен обеспечивать его высокие прочностные и трибологические свойства при тяжелых условиях эксплуатации.

В настоящее время широко используются два типа колпаков:

- литой, изготовленный из сталей: 20ГЛ, 20ГФЛ (ГОСТ 977-88).
- штампосварной из сталей: 09Г2С, 09Г2Д, (ГОСТ 1928-89).

Используемые материалы для изготовления колпака скользуна не в полной мере обеспечивают требуемый уровень эксплуатационных характеристик, а это приводит к сокращению нормативного межремонтного пробега грузового вагона.

Одним из наиболее перспективных вариантов модернизации тележки является использование более износостойких сплавов Fe-C. Альтернативным материалом для замены существующих не обеспечивающих требования по износу и циклической стойкости может стать износостойкий чугун ЧМН-35М.

Износостойкие чугуны обладают улучшенным комплексом основных физико-механических и служебных свойств, меньшей склонностью к разрушению, а также более высоким уровнем сопротивления ударного и длительного циклического воздействия. [7-10]

В результате выполнения комплекса исследований по выплавке и оценке основных характеристик была разработана новая композиция чугуна для отливки деталей тележки грузового вагона. При выпуске расплав дополнительно обрабатывается комплексным модификатором, содержащим цирконий, барий, кальций и алюминий. [11-13]

Разработана новая марка чугуна условной марки ЧМН-35М, химический состав и механические свойства которого приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Химический состав чугуна марки ЧМН-35М

Марка чугуна	Массовая доля элементов, %								
	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	Cu	P	S
						не более			
ЧМН-35М	2,5÷2,8	1,3÷1,5	0,7÷1,0	0,6÷0,9	0,5÷0,8	≤0,3	≤0,3	≤0,2	≤0,1

Таблица 2 – Механические свойства чугуна марки ЧМН-35М

Марка чугуна	Временное сопротивление при растяжении, МПа, (кгс/мм$^{2)}$, не менее	Твердость по Бринеллю	
		не менее	не более
ЧМН-35М	350 (35)	250	300

По результатам исследования образцов чугуна, полученного при легировании синтетического серого чугуна марки СЧ35 никелем и молибденом, с последующей обработкой расплава модификатором «Z-GRAPH®T», установлено, что чугун марки ЧМН-35М обеспечивает заданные параметры по химическому составу, механическим свойствам и структуре.

При этом средний показатель временного сопротивления на разрыв составил свыше 380 Н/мм^2 при средней твердости 285 НВ.

Микроструктуру чугуна для колпака скользуна исследовали на шлифах, изготовленных из рабочей поверхности. Исследование приводилось на инвертированном микроскопе при увеличениях х100 и х500. Просмотр шлифов, в нетравленом виде, позволил идентифицировать графитную фазу (рис.2а).

В структуре металлической основы образцов из легированного чугуна наряду с перлитом (рис.2б) присутствует игольчатый феррит (малоуглеродистый бейнит) и цементит (рис. 2в), при этом установлено, что:

- чугун имеет перлитно-ферритную металлическую основу;
- 85% занимают перлитные области;
- 30% перлита с межпластинчатым расстоянием 0,8-1,3 мкм;
- 70% перлита с межпластинчатым расстоянием 0,3 – 0,8 мкм;
- 15% занимает феррит, насыщенный сеткой из отдельных карбидных включений, толщиной 1-5 мкм, длиной 5-30 мкм. [14]

На основании сравнения данных по требованию технических условий и полученного сплава можно утверждать, что чугун ЧМН-35М полностью соответствует эксплуатационным требованиям, исходя из наличия необходимой твердости рабочих

поверхности отливок, которая напрямую связывается с величиной межремонтного пробега грузового вагона, а также возможностью в дальнейшем проведения конструкторских доработок колпака скользуна с целью уменьшения его материалоемкости.



а) б) в)

Рисунок 2 – Микроструктура образцов: а) пластинчатая завихренная форма включений графита; б) перлит и игольчатый феррит; в) включения цементита

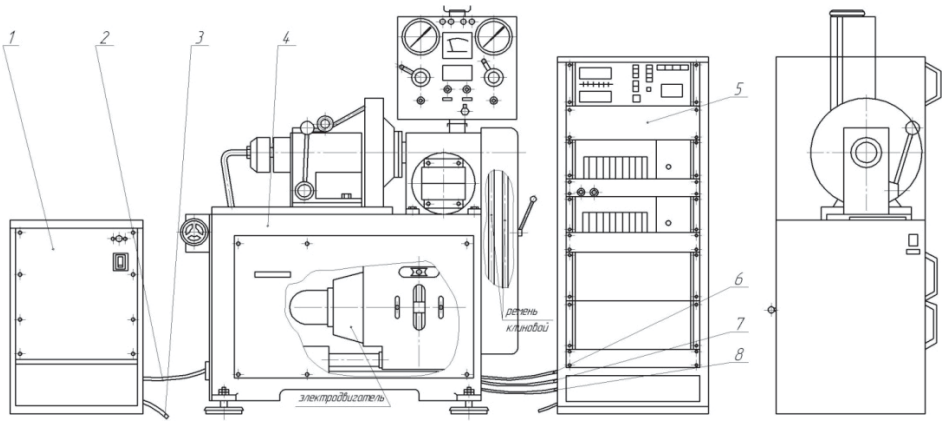
Таким образом целью исследования является установление износостойких свойств материалов применяемых при изготовлении узлов тележки грузового вагона.

Задачами исследования является выявление зависимости весового износа, от длины пути в результате взаимодействия трущихся поверхностей. Проведение сравнительных испытаний материалов на основе сравнительной оценки триботехнических характеристик посредством весового износа. А также проведение металлографического анализ сплавов Fe-C, выявления взаимосвязи структуры материала и износостойкости.

Выбор оборудования осуществлялся согласно точностным и динамическим характеристикам, удовлетворяющим всем необходимым условиям проведения эксперимента. В качестве испытательного оборудования используется машина трения модели 2168 УМТ. (Общий вид машины приведен на рисунке 3). [15]

Исследования проводятся с использованием специально изготовленных образцов представляющих собой пару «вал – колодка».

Колодка и вал изготавливается из материала, выбранного для исследования. На нерабочей поверхности колодка имеет паз для базирования в приспособлении машины трения (конструктивно-геометрические параметры колодки и вала представлены на рисунке 4). Для проведения испытаний колодка устанавливается в корпус, вал устанавливается на оправку. Перед каждым циклом испытаний выполняется промывка и просушка образца для удаления пыли и продуктов износа. Рабочие условия проведения эксперимента достигаются на машине трения, путем сообщения втулке вращательного движения вокруг собственной оси, а колодке давления на вал соответствующего удельному давлению согласно программе испытаний.



\Рисунок 3 – Машина трения 2168 УМТ. 4 - установка испытательная с пультом оперативным, 5 - пульт управления с записывающим устройством, 1 - пульт с силовым оборудованием и 2,3,6,7,8 - устройства соединительные.

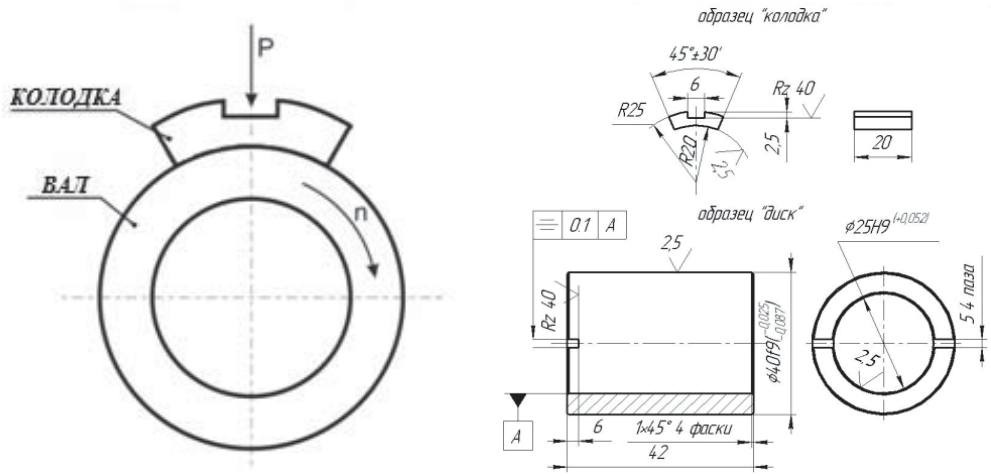


Рисунок 4 – Схема испытания и конструктивно-геометрические параметры колодки и вала.

В качестве параметров при испытаниях выступают:

- окружная скорость вращения на поверхности вала (V), м/с;
- усилие прижима колодки к диску (P), Н;
- длина, пройденная валом относительно поверхности колодки (L), м.

Исследуемые пары трения на примере трибосочетания материалов в тележке грузового вагона приведены в таблице 3.

Для оценки износостойких свойств материалов использовали режим близкий к эксплуатационному:

- длина пути: 1000 метров.
- скорость вращения вала: 500 об/мин
- нагрузка колодки: 20 кг/см^2.

Результаты

Результаты испытаний материалов на машине трения 2168 УМТ приведены в таблице 3, рисунке 5 и 6.

Износостойкость испытанных материалов определялась как величина, обратная средней скорости изнашивания, которая рассчитывалась как разность массы образцов после приработки и после окончания испытаний, отнесенная к числу оборотов рабочего вала машины. [16-17]

Анализ величин весового износа показывает, что износостойкость валов с использованием чугуна марки ЧМН-35М в паре трения с колодками 09Г2С и 20ГЛ примерно на 14 процентов выше, чем в парах терния с валами из сталей 09Г2С и 20ГЛ, что подтверждает возможность повышения износостойкости колпака скользуна изготовленного из серого чугуна путем использования технологий легирования молибденом и никелем.

Износостойкий чугун кроме более высокой твердости по сравнению с низкоуглеродистой сталью, в своей структуре содержит графит, играющий роль твердой смазки.

Таблица 3 – Весовой износ пар трения

№	Образец	Материал	Масса весового износа, гр.	Суммарный износ пар трения, гр.
Опора кузова вагона - Колпак скользуна				
1	Колодка	09Г2С	0,45	0,80
	Вал	20ГЛ	0,35	
2	Колодка	09Г2С	0,13	0,69
	Вал	ЧМН-35М	0,56	
3	Колодка	20ГЛ	0,10	0,60
	Вал	ЧМН-35М	0,50	
4	Колодка	20ГЛ	0,28	0,71
	Вал	20ГЛ	0,43	

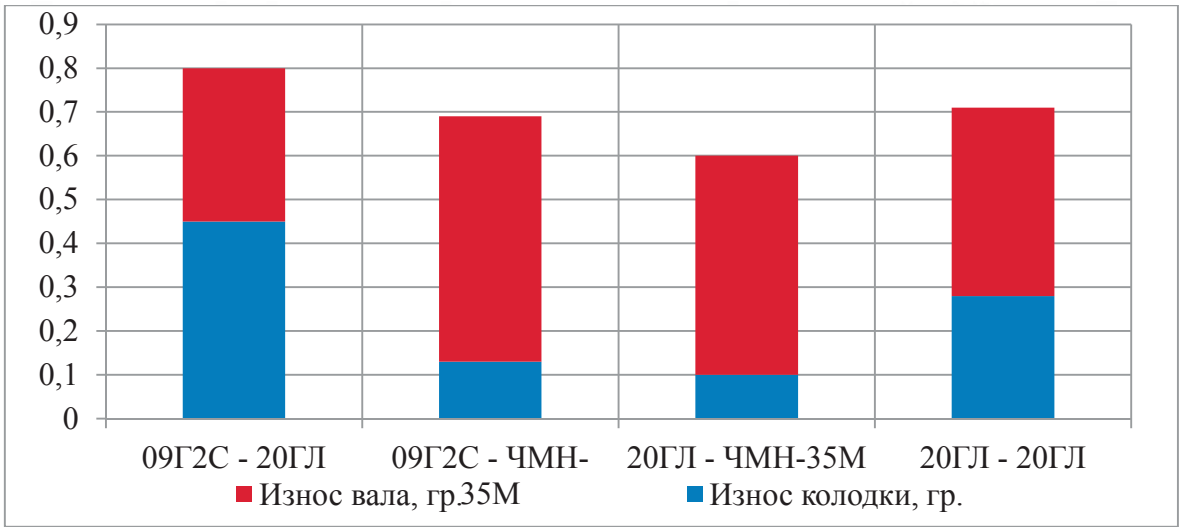


Рисунок 5 – Гистограмма износа пар трения колпак скользуна – опора кузова вагона.

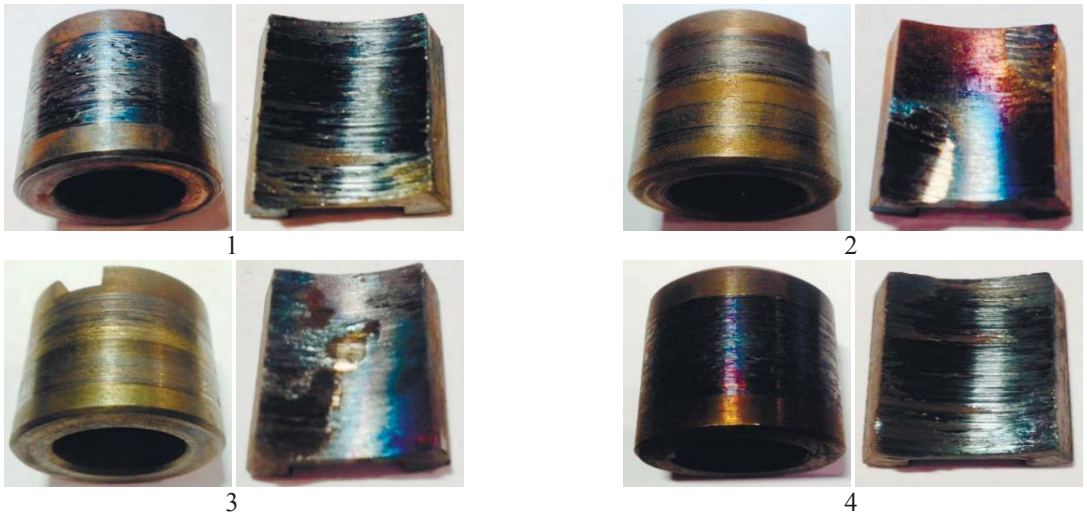


Рисунок 6 – Фото образцов пар трения

Выводы:

1. Суммарный анализ весового износа показал, что в узле опора кузова вагона – колпак скользуна, наиболее перспективно использование сочетание материалов 09Г2С и ЧМН-35М.
2. Износостойкость пар трения с использованием ЧМН-35М, на 14 процентов выше, чем в парах трения со стандартными материалами применяемые при изготовлении колпака скользуна.
3. Применение материалов с высокими механическими характеристиками (например, перлитного чугуна, легированного молибденом и никелем (ЧМН-35М)), позволяет использовать его в конструктивных высоконагруженных узлах тележки грузового вагона, обеспечивая демпфирующие способности и формирующий условия трения, при котором происходит минимальный износ сопряженных дорогостоящих деталей.

Список литературы:

1. *Шпади Д. В.* Новым грузовым вагонам - инновационные узлы и детали. Журнал Техника Железнодорожных дорог. №1 от 17 февраля 2012 года. – С.46.
2. *Лукин В. В., Анисимов П. С., Федосеев Ю. П.* Вагоны. Общий курс: Учебник для вузов ж.д. трансп. /Под ред. В. В. Лукина. М.: Маршрут, 2004. - С.103.
3. *Габец Д. А., Габец А. В., Марков А. М.* Повышение надежности деталей тележки грузового вагона путем рационального выбора материала // Актуальные проблемы в машиностроении. Материалы первой международной научно-

практической конференции. г. Новосибирск: 2014. С. 542-545.

4. *Давыдов, А.Н.* Анализ схем опирания кузова грузового вагона на ходовые части [Текст] / А.Н. Давыдов // Наука и современность — 2010: Сб. матер. Ш Междунар. науч.-практ. конф. / Под общ. ред. С.С. Чернова. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. -Ч. 2. - С. 128-131.

5. *Демин, Ю.В.* Исследование по выбору конструктивной схемы ходовых частей грузовых вагонов [Текст] / Ю.В. Демин, М.Л. Коротенко, Д.Д. Мехов // Проблемы динамики и прочности железнодорожного подвижного состава: межвуз. сб. науч. тр. / ДИИТ. - Днепропетровск: Б.и., 1980. — вып. 210/27 - С. 83-87. — (Труды Днепропетровского ин-та инженеров железнодорожного транспорта им. М.И. Калинина; вып. 211/9).

6. *Ефимов В.П., Пранов А.А.* Модернизация тележки модели 18-100 - эффективный путь повышения безопасности движения поездов. Тяжелое машиностроение, 2003. №12. - С. 6 - 9.

7. *Габец А. В., Сухов А.В., Филиппов Г.А.* Специальный модифицированный легированный чугун для фрикционного клина вагонных тележек//Литейное производство. 2014. №4. С. 2-4.

8. *Габец А. В.* Специальный чугун для отливки фрикционного клина тележки железнодорожного вагона // Ползуновский вестник. 2013. № 4/2. С. 51 – 52.

9. *Габец Д. А., Габец А. В.* Специальный чугун для отливки фрикционного клина тележки железнодорожного вагона // Развитие науки и образования в современном мире: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 сентября 2014г. . Москва: АР-Консалт, 2014. С. 88-90.

10. *Шумихин В. С., Лузан П. П., Желнис М. В.* Синтетический чугун. Киев: Наукова думка, 1971. С. 157

11. *Гиршович Н. Г.* Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. М.: Машиностроение,1996. С. 562

12. Свойства и особенности производства модифицированного чугуна: Сб. статей. - М.: ЦНИИТМАШ, 1976. С. 66

13. *А.Ф.Ланда.* Основы получения чугуна повышенного качества. - М., МАШГИЗ, 1960. С. 45-98

14. *Гольдштейн Я. Е., Мизин В. Г.* Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. М.: Металлургия, 1986. С. 272

15. *Марков. А. М., Габец Д. А., Габец А. В., Некрасов В. Н., Каргин В. В.* Методика испытания материалов на износостойкость //Инновации в машиностроение – основа технологического развития России: Материалы 4 международной научно-технической конференции: Часть1/под. Ред. А. Г. Суслова, А. М. Маркова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 253 – 258

16. *И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский*; Под ред. Д.Г. Громаковского Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов. Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2000. С. 202-213

17. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В.Чичинадзе, Э.М.Берлинер, Э.Д.Браун и др.; Под общ. ред. А.В.Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. С. 576

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SPECIAL CAST IRON CHMN-35M

Gabets D. A.[1], Post-graduate student, e-mail: gabets22@mail.ru,
Kargin V. V.[1], Post-graduate student, e-mail: w_w_k@mail.ru,
Chertovskikh E. O.[1], Post-graduate student, e-mail: gabets22@mail.ru,
Markov A. M.[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru,
Gabets A. V.[2], Candidate of Engineering Sciences, Development director

[1] Barnaul, Lenina 46, Altai State Technical University, 656038, Russian Federation
[2] Barnaul, Kalinina 116/52, Altai steel casting factory (ASCF), 656037, Russian Federation

Abstract: In this paper, we consider the option of upgrading the freight-car bogie using wear-resistant materials. The properties of materials installed, they used unit constructions of freight-car bogie. A new composition of wear-resistant cast iron developed for casting parts of freight-car truck. Mechanical properties were presented from wear-resistant cast iron ChMN-35M, microstructure of cast iron were showed. Results of tribological tests were included in our article, weight wear of steel and cast iron found. On the completion of wear-resistant testing were carrying out analysis and were made the conclusion.

Keywords: freight-car truck, wear-resistant cast iron, Fe-C, special cast iron ChMN-35M, investigation tribological properties, microstructure of cast iron.

УДК 621.7.011.+621.9.011

ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА МАЛОЖЕСТКИХ ВАЛОВЦЕНТРОБЕЖНЫМ ОБКАТЫВАНИЕМ

С. А.ЗАЙДЕС (Иркутский ГТУ)
А. В. ГОРБУНОВ (ИркутскНИИхиммаш)

Аннотация: Для эффективного упрочнения маложестких валов предложен новый подход позволяющий определить рациональные режимы обработки. Разработана эффективная конструкция обкатника центробежного типа. Представлены расчетные зависимости для основных режимов обкатки. Изложены экспериментальные результаты определения параметров шероховатости, твердости и остаточных напряжений упрочненных валов.

Ключевые слова: центробежный обкатник, кристаллические зерна, поверхностный слой, шероховатость, твердость, остаточные напряжения.

Локальные методы упрочнения (обкатка шариком, роликом, диском), которые в настоящее время имеют практическое распространение на производстве, не позволяют достичь необходимых результатов, когда требуется обрабатывать валы малой жесткости [1]. Даже при отсутствии внешнего воздействия такие валы при вращении получают изгибную деформацию под действием центробежных сил.

Деформирующее усилие малой величины снижает степень искривления валов, но не обеспечивают качества поверхностного слоя и заданных механических характеристик. Большие усилия не только искажают форму изделия, но и приводят к существенной неравномерности механических свойств и напряженного состояния по длине вала.

В связи с вышеизложенным задачей данной работы является создание деформирующего устройства и определение рациональны технологических режимов, позволяющие повысить качество поверхностного слоя длинномерных валов при сохранении точности и стабильности геометрической формы.

Конструкция и параметры центробежного обкатника. Чтобы избавиться от большой части проблем, обусловленных динамикой взаимодействия частей технологической системы при обработке валов малой жесткости, необходимо остановить вращение детали и использовать деформирующий инструмент с полным силовым замыканием. Для обработки нежестких валов необходим инструмент с высокой стабильностью рабочего усилия, простой по конструкции и не требующий значительных затрат времени на настройку.

Для обеспечения стабильности силы инерции (она же рабочее усилие) разработан инструмент [1], в котором контролируется только два фактора: радиус вращения и угловая скорость. На рычаге закрепляется деформирующий инструмент и груз (Рис. 1).

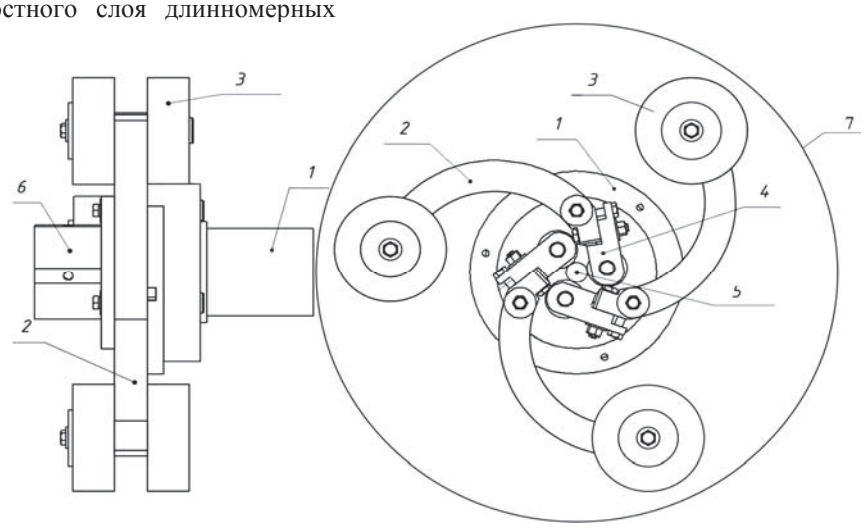


Рисунок 1 – Конструкция центробежного обкатника: 1 – корпус и лекало; 2 – криволинейный рычаг; 3 – груз; 4 – державка с деформирующим роликом; 5 – обкатываемая деталь; 6 – дополнительная опора; 7 – защитный кожух

Вся система вращается относительно неподвижной оси заготовки, и сила инерции груза создает момент относительно точки закрепления рычага, который уравновешивается моментом рабочего усилия относительно той же точки.

Усилие прижима роликов к поверхности заготовки пропорционально квадрату частоты вращения центробежного обкатника:

$$P_r = (15P_3 + 65)n^2 10^{-5}, \quad (1)$$

где P_3 – масса груза, Н; n – частота вращения инструмента, об/мин.

Получена аналитическая зависимость для расчета глубины упрочнения h_t в пределах зоны взаимного влияния:

$$h_t = \frac{1}{k}\left(\sqrt{\frac{(15P_3 + 65)n^2 10^{-5}}{\pi\alpha_1\sigma_n} + \frac{1}{4}(a-b)^2} - \frac{1}{4}(a+b)\right) + t, \quad (2)$$

где a, b –полуоси эллипса пятна контакта ролика с деталью; t – глубина невосстановленной лунки, σ_n – нормальное напряжение в очаге деформации, k–коэффициент, характеризующий глубину распространения пластической деформации от давления ролика, α_1 – коэффициент, учитывающий изменение площади пятна контакта при вращении инструмента. Коэффициенты определяют экспериментально.

Размеры полуосей a, b контура пятна контакта и глубину лунки t можно рассчитать по методике изложенной в работе [2]. Нормальное напряжение σ_n в очаге деформации равно:

$$\sigma_n = (2{,}5..2{,}6)\sigma_{кр} = K_\sigma\sigma_{кр}.$$

Установлена аналитическая зависимость для расчета рациональной частоты вращения центробежного обкатника, обеспечивающей глубину упрочнения равную размеру зоны взаимного влияния:

$$n = 100\sqrt{\frac{10\pi k_\sigma\alpha_1\left(\left(kk_d d^{0,792} - t + \frac{1}{4}(a+b)\right)^2 - \frac{1}{4}(a-b)^2\right)}{(15P_3 + 65)}\cdot\sigma_{кр}}, \quad (3)$$

где K_d= 0,0257; K_σ= 2.5…2.6; K =1…10., $\sigma_{кр} = 229{,}1C + 127{,}6$.

Здесь C – содержание углерода в стали, %.

Определение рациональных параметров упрочнения. Рассмотрим основные результаты экспериментального определения рациональных параметров упрочнения маложестких валов и результаты исследования качественных показателей поверхностного слоя при центробежном обкатывании.

Измерение шероховатости поверхности заготовок до ППД и после обкатки центробежным обкатником выполнено с использованием стандартизованной методики на приборе Абрис ПМ 7.

Для оценки шероховатости использованы четыре параметра: среднее арифметическое отклонение профиля R_a, средний шаг неровностей S_m, распределение опорных линий по уровням t_p, коэффициент несущей способности $K = S_m/R_a$. Результаты экспериментов, полученные после обработки профилограмм, представлены на рис. 4–5.

С увеличением частоты вращения обкатника происходит трансформация исходных микронеровностей. При частоте вращения 250 об/мин и подаче близкой к оптимальной, наблюдалось «смятие» вершин профиля с одновременным увеличением радиусов закруглений и углов при его вершине. Высота неровностей профиля по десяти точкам уменьшилась в 40,5 раза, средний шаг неровностей профиля - в 6 раз. В интервале частот вращения от 315 до 400 оборотов в минуту формировалась шероховатость с минимальным отклонением микропрофиля от средней линии и минимальным средним шагом неровностей. По сравнению с исходной шероховатостью эти параметры уменьшились соответственно в 33 раза и 10 раз (см. рис. 2).

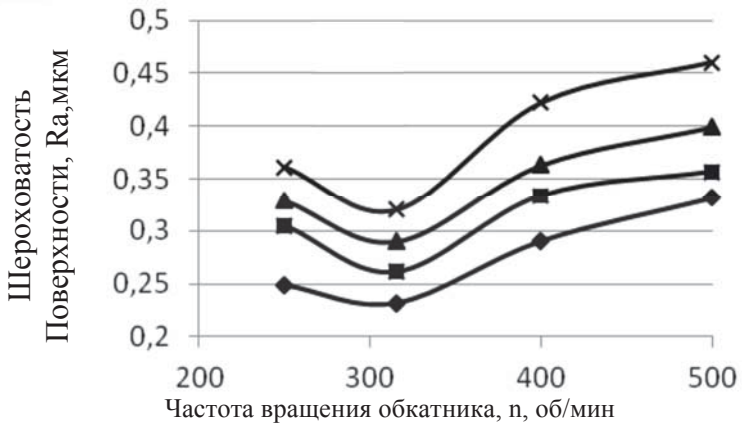


Рисунок 2 –. Зависимость шероховатости от частоты вращения обкатника при разной продольной подаче: ♦ - S_m=0,75 мм/об, ■ - S_m=0,11 мм/об, ▲ - S_m=0,15 мм/об, × - 0,21 мм/об. Начальная шероховатость Ra – 1,25 мкм.

Обработка с частотой вращения выходящей за пределы оптимального интервала приводит к формированию вторичной (наведенной) шероховатости, наблюдается отслоение (выкрашивание) с поверхности. Средний шаг неровностей увеличивается в 3,5 раза, а высота неровностей по 10 точкам в 5 раз

Глубина упрочнения поверхностного слоя при центробежном обкатывании монотонно возрастает с увеличением числа оборотов (рис.3, кривая 1). В исследованном диапазоне шероховатостей (5,00-1,25 мкм) минимальная шероховатость поверхности заготовок из стали 35 с размером зерна 30 мкм наблюдалась при частоте вращения 315 об/мин., которой соответствует глубина упрочнения около 400 мкм. Эта величина близка к толщине ослабленного поверхностного слоя (размеру зоны взаимного влияния).

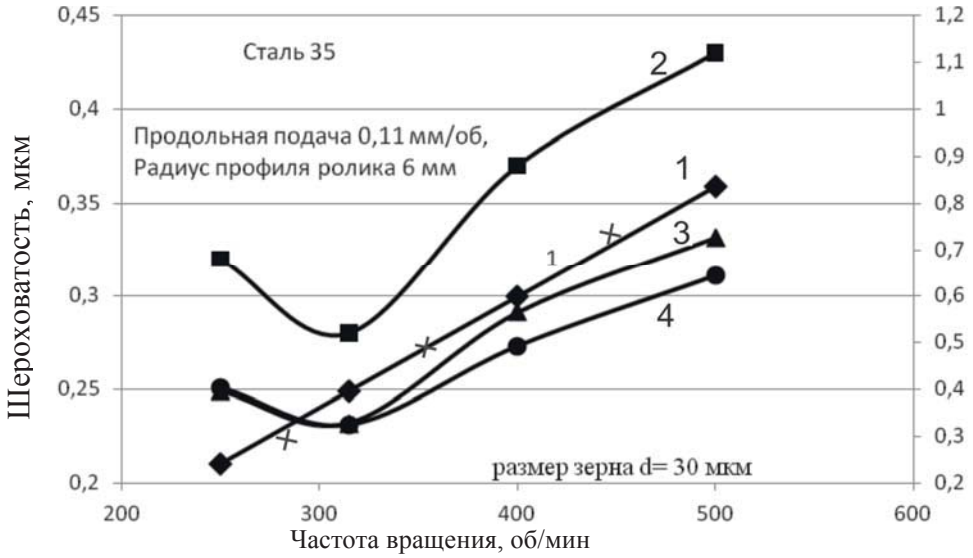


Рисунок 3 – Зависимость глубины упрочнения (1) и шероховатости поверхности вала (2, 3, 4) от частоты вращения центробежного обкатника:.■ – исходная шероховатостьRa=5,0 мкм;▲ – исходная шероховатость Ra=1,25 мкм; ● – исходная шероховатость Ra = 2,5 мкм; × - глубина упрочнения определенная экспериментально

Размер шероховатости существенно не изменяется по сравнению с оптимальной при уменьшении глубины упрочнения почти в 2 раза (см. рис 3). Этот экспериментальный факт позволяет утверждать, что рациональные технологические параметры обработки ППД нежестких деталей следует искать вблизи границы зоны взаимного влияния.

Для нежестких валов глубина упрочнения ограничена размером зоны взаимного влияния, величиной критического напряжения и деформации, однозначно определяемых для данного материала. При наличии названных ограниче-

ний величина усилия прижима ролика и величина профильного радиуса определяются из достаточно узкого диапазона их значений. Это приводит к тому, что величина подачи, обеспечивающая необходимый интервал значений шероховатости в значительной степени зависит от исходной шероховатости поверхности заготовки. Для проверки этого предположения проведены эксперименты на образцах из стали 35. Обработка результатов позволила получить зависимость продольной подачи от исходной и получаемой после обработки центробежным обкатником шероховатости:

$$S_m^p = \psi R_{ak} - \Omega \ , \qquad (4)$$

где S_m^p - продольная подача, мм/об; R_{ak} - шероховатость обкатанной поверхности, мкм; R_{ai} - исходная шероховатость поверхности заготовки, мкм.

$$\psi = 0{,}092R_{ai}^2 - 0{,}614R_{ai} + 2{,}357 ;$$

$$\Omega = 0{,}025R_{ai}^2 - 0{,}167R_{ai} + 0{,}517$$

Наибольшее значение в обеспечении стабильности геометрических параметров обработанной ППД заготовки имеют продольные остаточные напряжения, их величина и распределение по длине заготовки. Их изменение оценивали по величине макроскопического напряжения течения поверхностного слоя $\sigma_{B\varepsilon}$ (рис. 4,5) и по результатам рентгеноструктурного измерения. Остаточные напряжения в поверхностном слое определяли на рентгеновском анализаторе напряжений Xstress 3000G3/G3R.

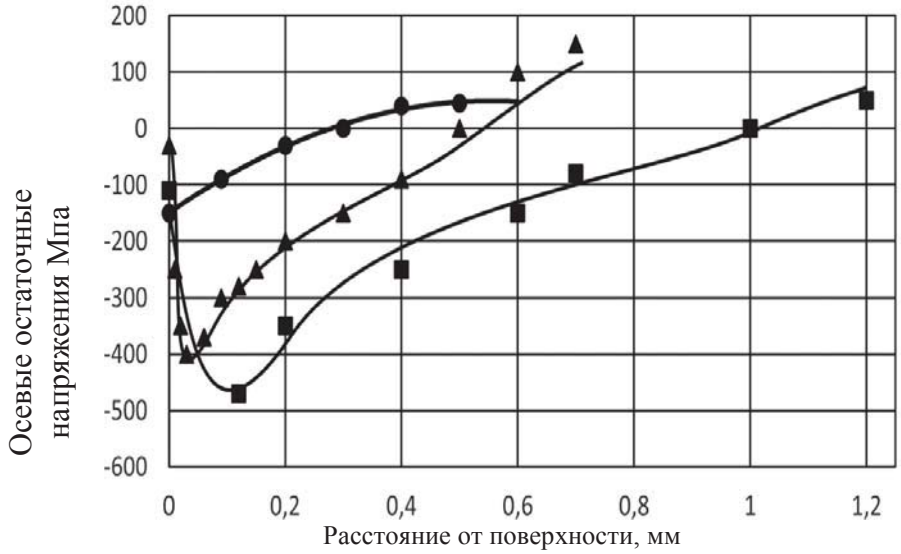


Рисунок 4 – Изменение осевых остаточных напряжения по глубине ПС при различной частоте вращения обкатника ● – 200 об/мин, ▲ – 315 об/мин, ■ – 500 об/мин. Сталь 35 с размером зерна 30 мкм. Ролик с профильным радиусом 5 мм, подача 0,11 мм/об, масса груза 2 кг

Наиболее интенсивно остаточные напряжения повышаются при увеличении частоты вращения обкатника до 330 об/мин. Затем интенсивность роста существенно уменьшается. При массе груза 2 кг этой частоте соответствует глубина упрочнения близкая к размеру зоны взаимного влияния. Такие же результаты получены на других сталях. При напряжении $\sigma_{B\varepsilon}$ в поверхностном слое начинается микропластическое течение, в результате которого происходит релаксация остаточных напряжений. Чем больше это напряжение, тем больше релаксационная стойкость изделий. На рис. 5 показано изменение $\sigma_{B\varepsilon}$ по длине нежесткого вала после обработки одним роликом и центробежным обкатыванием. Центробежная обкатка существенно уменьшила неоднородность распределения напряжений течения поверхностного слоя по длине вала.

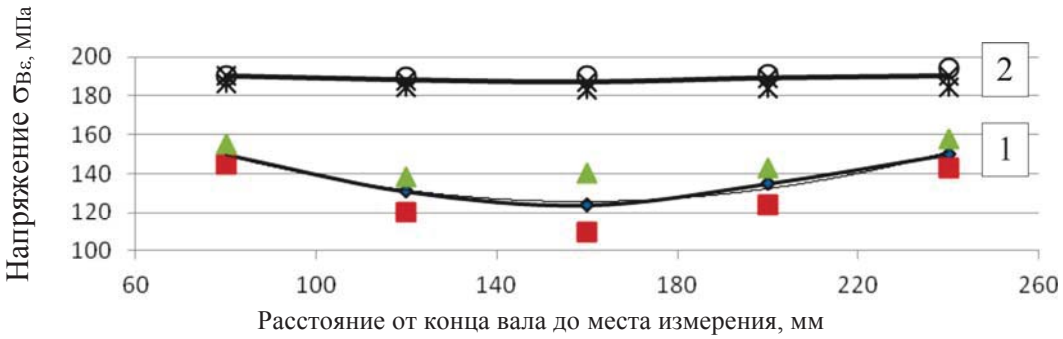


Рисунок 5 – Изменение напряжения $\sigma_{B\varepsilon}$ по длине образца 1 – Образец после обработки одним роликом, 2 – образец после центробежного обкатывания. Сталь 45, нормализация. Ролик с профильным радиусом 5 мм, подача 0,11мм/об, масса груза 2 кг. размер зерна 30 мкм.

Центробежная обкатка обеспечивает достаточную однородность упрочнения и может существенно изменить неоднородности предшествующей обработки точением, если глубина их распространения не превышает размеров зоны взаимного влияния.

Теоретические и экспериментальные результаты, полученные в работе, позволяют выбрать технологические параметры центробежного обкатывания. Вначале определяется средний размер зерна микроструктуры, выбирается масса груза в пределах от 0,5 кг до 2 кг, рассчитывается критическое напряжение. Рациональная частота вращения центробежного обкатника определяется по формуле (5). Если рассчитанная частота вращения меньше минимальной частоты вращения шпинделя станка, то следует увеличить массу груза.

Для расчета величины продольной подачи необходимо определить из конструктивных соображений допустимый интервал изменения шероховатости обкатанной поверхности, определяемый, прежде всего, точностью исполнения сопрягаемых поверхностей. Из анализа технологии обработки заготовки предшествующей центробежному обкатыванию прогнозируется исходная шероховатость поверхности заготовки. Рациональную величину продольной подачи рассчитывают по формуле (4).

Результате выполненных исследований показали, что качество обработки нежестких валов центробежным обкатником зависит от размеров и свойств зоны взаимного влияния, толщина которой зависит от среднего размера зерна микроструктуры. Неоднородность свойств этого приповерхностного объема и особенности его пластической деформации определяют результат отделочно-упрочняющей обработки.

Выводы:

1. Разработана конструкция центробежного обкатника, обеспечивающая неизменность рабочего усилия, стабильность деформации и напряжений по длине заготовки. Создан аналитический аппарат для расчета конструктивно-технологических параметров центробежного обкатника, обеспечивающего необходимые качественные показатели обработки ППД нежестких валов.

2. Предложена и экспериментально проверена методика расчета технологических параметров обработки нежестких валов центробежным обкатником, учитывающая особые механические характеристики и закономерности деформационного упрочнения поверхностного слоя.

3. Определены качественные показатели поверхностного слоя упрочненного центробежным обкатыванием: исходная шероховатость Ra снижается в 10-25 раз, глубина упрочненного слоя составляет 0,1-0,2 мм, твердость возрастает на 50-55 %, в поверхностных слоя формируются осевые остаточные напряжения сжатия величиной 400-450 МПа.

Список литературы

1. *Зайдес С.А.* Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. - Иркутск: Изд-во Иркут. гос. техн. ун-та, 2002. – 311 с.

2. *Горбунов А.В.*, *Горбунов В.Ф.* Закономерности деформационного упрочнения поверхностного слоя стали 25 // Вестник ИрГТУ, №6, 2011. – с. 50-52.

THE FINISHING-HARDENING TREATMENT OF NON-RIGID SHAFTS WITH A CENTRIFUGAL ROLLING

Zaydes S. A. (Irkutsk State Technical University)
Gorbunov A. V. (IrkutskNIIhimmash)

Abstract: For the effective hardening of non-rigid shafts the new approach making the identification of rational process rate possible is proposed. The effective construction of centrifugal roller is introduced. The calculated dependences for the main running modes are presented. The experimental results of characteristics' determination of roughness, hardness and residual stress of hardened shafts are shown.

Key words: centrifugal roller, crystal grains, surface layer, roughness, hardness, residual stress.

УДК 620.1; 621.791.011

СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ УГЛЕРОДИСТОЙ И ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ

И. П. КОЦУР, студент,
П. А. РЯБИНКИНА, студент,
И. Н. ГРАДУСОВ, студент,
А. А. НИКУЛИНА, канд. техн. наук, доцент
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)

Никулина А.А. - 630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: a.nikulina@corp.nstu.ru

Аннотация: Представлены структурные исследования сварных швов между заготовками из углеродистой (У8) и хромоникелевой (12Х18Н10Т) сталей, полученных лазерной сваркой при скоростях 50, 75 и 100 мм/с и одинаковой мощности лазерного излучения – 4 кВт. Структурные исследования были проведены с использованием методов световой, растровой электронной микроскопии и оценки микротвёрдости по Виккерсу. Полученные результаты показали, что сварные швы характеризуются существенной неоднородностью. При скоростях сварки 75 и 100 мм/с в сварных швах были обнаружены трещины. При скорости 50 мм/с крупных дефектов обнаружено не было, но уровень микротвёрдости сварного шва значительно превышает уровень микротвёрдости свариваемых материалов.

Ключевые слова: лазерная сварка, разнородные стали, углеродистая сталь, хромоникелевая сталь, микроструктура, микротвердость.

Введение. На сегодняшний день лазерная сварка используется для получения сварных соединений как между однородными, так и разнородными металлами и сплавами [1-5]. Лазерное излучение, исходящее от лазерной установки, фокусируется в пучок с меньшим сечением и попадает на контакт свариваемых деталей, где поглощенное излучение расплавляет металл, формируя сварной шов. Механические свойства швов, как показывает практика сварки деталей малой толщины (менее 10 мм), обычно находятся на уровне основного металла [1].

За последние 30 лет активно расширяется применение лазерных технологий в промышленности. Лазерная сварка занимает достойное место в различных производственных областях благодаря использованию ее достоинств - точности и скорости процесса [2].

Цель данной работы заключалась в исследовании особенностей строения сварных швов между заготовками из углеродистой и хромоникелевой сталей,

полученных лазерной сваркой на различных режимах.

Материалы и методы исследования. Для получения соединений использовали заготовки из сталей У8 и 12Х18Н10Т размерами 50×10×3 мм. Разделку кромок не проводили. Химический состав сталей приведен в таблице 1. Сварку осуществляли на установке Erlaser Weld. Режимы получения соединений представлены в таблице 2. Структурные исследования проводили с использованием светового микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m и растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy. Дюрометрические исследования выполняли на микротвердомере Виккерса 402MVD.

Таблица 1 – Химический состав свариваемых сталей.

Сталь	Химический элемент, % масс.							
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Ti
У8	0,79	0,25	0,30	0,007	0,009	0,27	0,06	0,002
12Х18Н10Т	0,12	0,87	0,75	0,003	0,024	16,84	9,16	0,319

Таблица 2 – Режимы сварки.

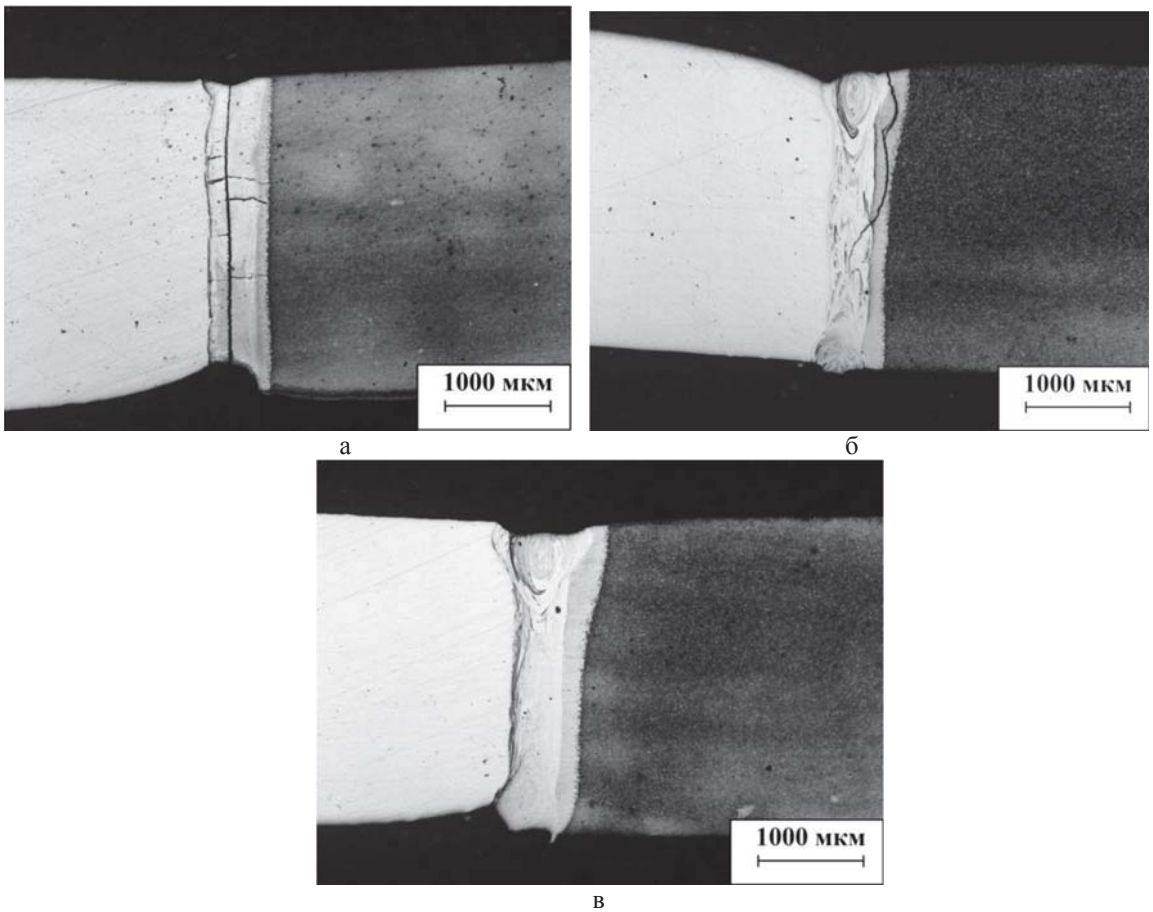
Номер режима	1	2	3
Скорость, мм/с	100	75	50
Мощность, кВт	4	4	4

Результаты и обсуждения. Общий вид сварных соединений, полученных на различных режимах, представлен на рисунке 1. Для всех сварных швов характерен высокий уровень микротвёрдости (рисунок 2). Максимальный уровень микротвёрдости (1527 HV) был зафиксирован на образцах, сваренных со скоростью 100 мм/с. При этом средний уровень микротвердости свариваемых материалов составляет 250 - 300 HV. Также высокий уровень микротвёрдости (1393 HV) в зоне сварного шва показали образцы, полученные на скорости 75 мм/с (рисунок 2). Для образцов, сваренных при скорости 50 мм/с, характерен существенно более низкий уровень микротвёрдости, находящийся на уровне 667 HV. Трещины, наблюдаемые на образцах, полученных по режимам № 1 и 2, свидетельствуют о высоком уровне внутренних напряжений в сварных швах.

Для всех сварных швов характерно дендритное строение (рисунок 3), а зоны термического влияния (ЗТВ) со стороны углеродистой стали имеют мартенситное строение (рисунок 4). Средняя ширина сварных швов и ЗТВ соответствующих режимов сварки приведены в таблице 3. Ширина сварных швов незначительно отличается. С уменьшением скорости сварки происходит увеличение ширины зоны термического влияния в углеродистой стали.

Таблица 3 – Средняя ширина сварных швов и зон термического влияния.

Номер режима	1	2	3
Сварной шов, мкм	465	415	500
ЗТВ, мкм	110	170	220



а б в

Рисунок 1 – Общий вид сварных соединений, полученных при различных скоростях сварки: а – 100 мм/с, б – 75 мм/с, в – 50 мм/с.

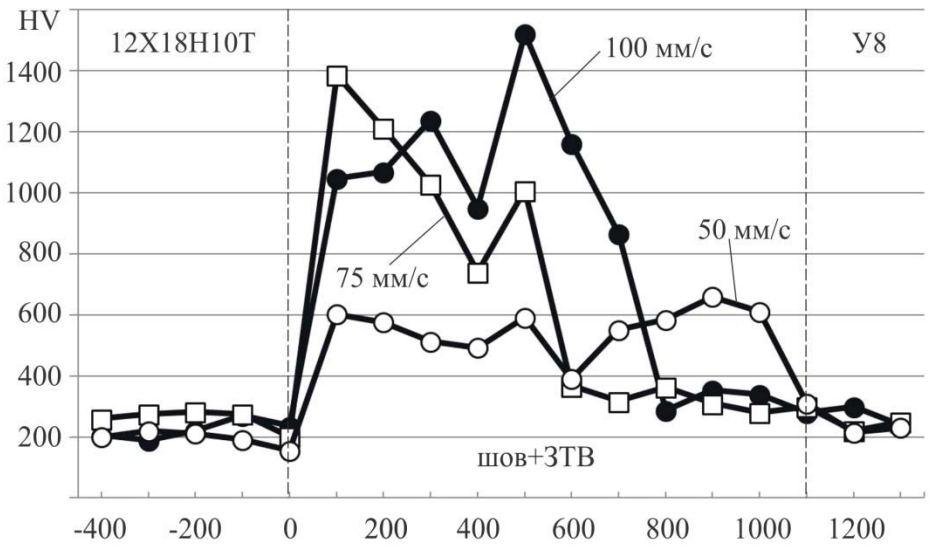
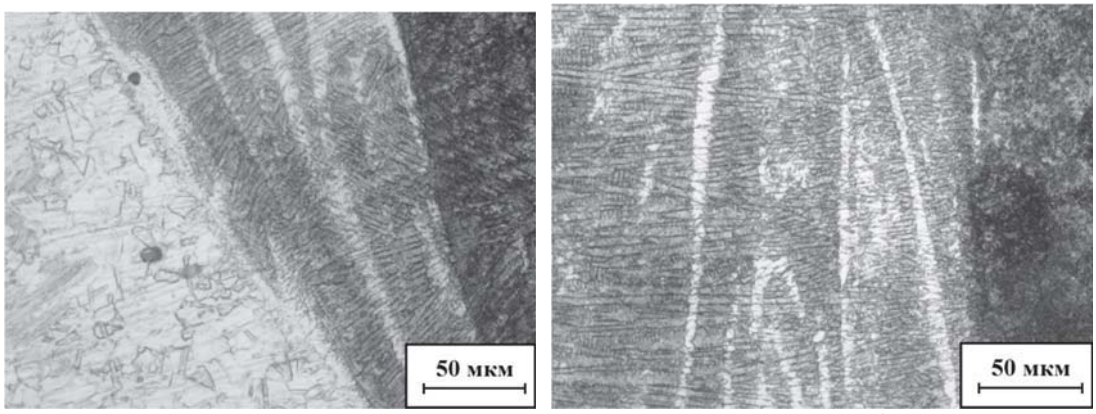


Рисунок 2 – Распределение микротвёрдости в сварных швах, полученных при различных скоростях сварки.



а б

Рисунок 3 –Переходная зона сварного шва со стороны хромоникелевой (а) и углеродистой (б) сталей.

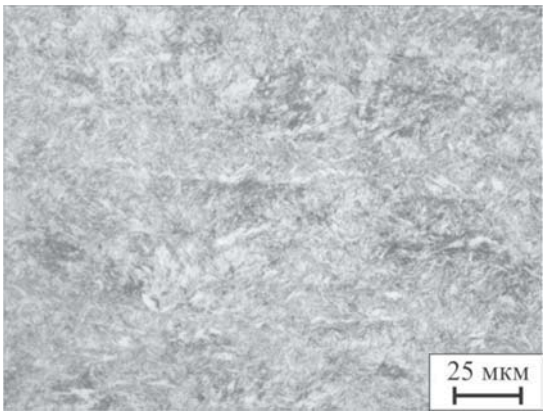


Рисунок 4 – Мартенситная структура ЗТВ в углеродистой стали.

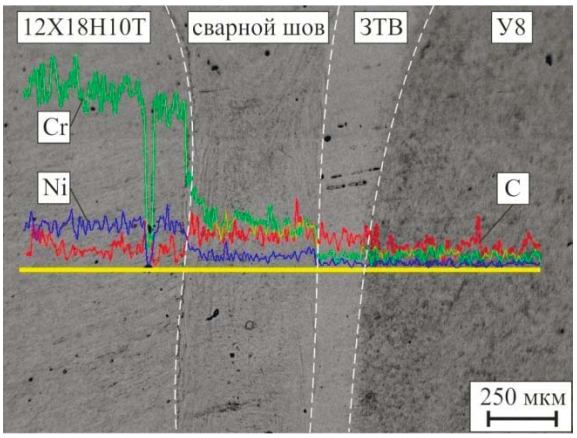


Рисунок 5 – Распределение химических элементов в сварном шве и ЗТВ.

Стоит также отметить, что для сварных швов, полученных на всех скоростях, характерна существенная химическая неоднородность. Распределение химических элементов по линии сканирования, перпендикулярной сварному шву, свидетельствует об этом (рисунок 5).

Выводы. Были проведены структурные исследования сварных соединений, полученных при разных скоростях сварки: 100 мм/с, 75 мм/с и 50 мм/с при мощности лазерного излучения 4 кВт. Все сварные швы характеризуются структурной и химической неоднородностью. В образцах, сваренных при скоростях 100 и 75 мм/с, были обнаружены трещины, вследствие чего использовать такие большие скорости лазерной сварки не целесообразно. Образцы, сваренные со скоростью 50 мм/с, не имеют дефектов, а также обладают наименьшим градиентом в уровне микротвердости в зоне сварного шва.

Список литературы

1. *Рябов В.Р.*, *Рабкин Д.М.* Сварка разнородных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 239 с.

2. *Wang S.*, *Ma Q., Li Y.* Characterization of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar welded joint between 2205 duplex stainless steel and 16MnR // Materials and Design. 2011. V. 32. Is. 2. P. 831-837.

3. *Kurt B.* The interface morphology of diffusion bonded dissimilar stainless steel and medium carbon steel couples // Journal of Materials Processing Technology. 2007. V. 190. P. 138–141.

4. *Chen H.-Ch.*, *Pinkerton A.J., Li L.* Fibre laser welding of dissimilar alloys of Ti-6Al-4V and Inconel 718 for aerospace applications // International journal of advanced manufacturing technology. 2011.V. 52. P. 977–987.

5. *Torkamany M.J.*, *Sabbaghzadeh J., Hamedi M.J.* Effect of laser welding mode on the microstructure and mechanical performance of dissimilar laser spot welds between low carbon and austenitic stainless steels // Materials and Design. 2012. V. 34. P. 666–672.

STRUCTURAL INVESTIGATION OF CARBON STEEL AND CHROME-NICKEL STEEL JOINTS OBTAINED BY LASER WELDING

Kotsur I. P.
Ryabinkina P. A.,
Gradusov I. N.,
Nikulina A. A., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: a.nikulina@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University;20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia;
a.nikulina@corp.nstu.ru, dontknowalrdy@gmail.com

Abstract: The joint of dissimilar metals between eutectoid steel and chrome-nickel steel are welded by laser beam with three different welding speeds 50, 75 and 100 mm/s with identical laser beam power of 4 kW. The microstructure of dissimilar joints was investigated using light and scanning electron microscope. Also microhardness was conducted across the welded joints by using Vickers' microhardness testing machine.

Keywords: Laser welding, dissimilar steels, carbon steel, chrome-nickel steel, microstructure, microhardness.