

ВЕСТНИК
САРАТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
2011

№ 2 (56)
Выпуск 2

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.
Выходит один раз в квартал
Июнь 2011 г.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых журналов и научных изданий, утвержденный президиумом ВАК Министерства образования и науки РФ, в которых публикуются основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Главный редактор д.и.н., профессор И.Р. Плеве
Зам. главного редактора д.т.н., профессор А.А. Сытник
Ответственный секретарь д.ф.-м.н., профессор В.В. Астахов

Редакционный совет: д.т.н. В.И. Волчихин, д.т.н. В.А. Голенков, д.и.н. В.А. Динес, д.х.н. В. Зеленский (Польша), д.т.н. В.А. Игнатьев, д.т.н. В.В. Калашников, д.т.н. И.А. Новаков, д.и.н. И.Р. Плеве (председатель), д.т.н. А.Ф. Резчиков, д.социол.н. С.Б. Суровов, д.т.н. А.А. Сытник (заместитель председателя), д.ф.-м.н. Я. Аврейцевич (Польша), д.э.н. Арнольд У. (Германия), д.ф.-м.н. Э. Мерсер (Великобритания), д.э.н. Э. де Соуза Феррейра (Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов

Редакционная коллегия: д.т.н. В.А. Крысько, д.ф.-м.н. В.В. Астахов, д.х.н. А.В. Гороховский, д.т.н. В.Н. Лясников, д.ф.-м.н. Л.А. Мельников, д.т.н. Р.З. Аминов, д.т.н. Ю.Г. Ивашенко, д.т.н. А.С. Денисов, д.т.н. А.А. Сытник, д.т.н. А.А. Большаков, д.филос.н. Д.В. Михель, д.биол.н. Е.И. Тихомирова, д.э.н. А.Н. Плотников, д.и.н. Г.В. Лобачева

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Р.В. Виноградовой
Перевод на английский язык А.М. Руст

Адрес редакции:
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845 2) 79 43 43
E-mail: vestnik @ sstu. ru
<http://dni. sstu. ru/vestnik.nsf>
Факс: (845 2) 50 67 40

Подписано в печать 25.06.11
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 35,0 Уч.-изд. л. 13,75
Тираж 500 экз. Заказ 214
Отпечатано в Издательстве СГТУ,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Подписной индекс 18378
(каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2011 г.)

ISSN 1999-8341

© Саратовский государственный
технический университет, 2011

**VESTNIK
SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY
2011**

**№ 2 (56)
Issue 2**

Scientific Journal

Since 2003
Once in a quarter
June 2011

This journal is included into the list of leading reviewed journals and scientific publications approved by the presidium of Ministry of Education and Sciences of Russian Federation where major scientific thesis's results for academic degree competition for a doctor and a candidate of sciences

Editor-in-chief Professor I.R. Pleve
Editor-in-chief assistant Professor A.A. Sytnik
Executive secretary Professor V.V. Astakhov

Drafting committee: Prof. V.I. Volchihin, Prof. V.A. Golenkov, Prof. V.A. Dines, Prof. V. Zelensky (Poland), Prof. V.A. Ignatyev, Prof. V.V. Kalashnikov, Prof. I.A. Novakov, Prof. I.R. Pleve (Chairman), Prof. A.F. Rezchikov, Prof. A.A. Sytnik (Vice of the Chairman), Prof. S.B. Surovov, Prof. Y. Avreytsevich (Poland), Prof. U. Arnold (Germany), Prof. A. Merser (UK), Prof. E. D'Sousa Ferreira (Portugal), Prof. T. Chermak (Chezh Republic), Prof. Y.V. Shlenov

Editorial board: Prof. V.A. Krysko, Prof. V.V. Astakhov, Prof. A.V. Gorokhovski, Prof. V.N. Lyasnikov, Prof. L.A. Melnikov, Prof. R.Z. Aminov, Prof. Y.G. Ivashchenko, Prof. A.S. Denisov, Prof. A.A. Sytnik, Prof. A.A. Bolshakov, Prof. D.V. Mikhel, Prof. Y.I. Tihomirova, Prof. A.N. Plotnikov, Prof. G.V. Lobacheva

Editor L.A. Skvortsova
Computer-based page-proof R.V. Vinogradova
Rendering A.M. Rust

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054
Russia
Telephone: +8452/79 43 43
E-mail: vestnik @ sstu. ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Fax: +8452/50-67-40

Signed for publishing: 25.12.06
Format 60×84 1/8 Paper offset.
Apr. tp. l. 35,0 Acc.-pbl. l. 13,75
Edition 500 psc. Order 214
Printed in EPC of SSTU
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

Содержание

Машиностроительный факультет: этапы становления и развития	9
---	----------

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Аничкин А.Н., Королев А.В. Механизм формирования механических свойств многослойных деталей	11
Асоян А.Р. Условия осаждения равномерных покрытий электролитического железа при восстановлении изношенных поверхностей деталей машин.....	18
Бабенко М.Г., Слесарев С.В., Бабенко А.И. Измерение остаточных напряжений в материале технических объектов методом зондирующего отверстия	21
Белов А.П., Бочкарев П.Ю. Совершенствование технологической подготовки производства на основе установления взаимосвязей между характеристиками конструктивных элементов деталей и принятием проектных решений при разработке технологических процессов	24
Бокова Л.Г. Структура оценки производственной технологичности деталей в многономенклатурных механообрабатывающих системах	27
Виноградов А.Н., Константинов Р.А. Выбор рациональных технологических режимов операции шарошечной обработки на станке с новой кинематикой	31
Денисов А.С., Альмеев Р.И. Повышение долговечности подшипников коленчатого вала использованием предпусковой смазки	34
Денисов А.С., Асоян А.Р., Суханкин А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния коренных опор блока цилиндров двигателя КАМАЗ	38
Денисов А.С., Иванов И.Г. Изменение технического состояния сальника под влиянием эксплуатационных факторов	41
Добряков В.А. Формализация оценки технического состояния станков как объектов контроля, диагностирования и испытаний	45
Ермольчева Н.В., Королев А.В., Орлов Б.С. Устройство для дискретного вибрационного резания с созданием регулярного микрорельефа с требуемыми параметрами.....	52
Земсков В.М. Моделирование движения вибрационного наконечника для проходки горизонтальных скважин.....	57
Иванов А.А., Бочкарев П.Ю. Формализация задачи составления оптимального плана реализации технологических процессов механообработки в многономенклатурном производстве.....	61
Каракозова В.А., Игнатьев А.А. Выбор подачи круга для обеспечения качества обработки колец подшипников на основе идентификации динамической системы шлифовального станка	69
Карачаровский В.Ю., Рязанов С.А. Визуализационная оценка параметров локализованного контакта в червячных передачах на основе применения методов 3D компьютерной графики	73
Кожуховская Л.Я., Павлова Н.П. Критериальная оценка инновационных преобразований технологических структур	77
Козлов Д.В., Игнатьев А.А. Экспериментальное исследование частоты правки шлифовального круга	80
Королев А.В. Исследование момента сопротивления вращению и статической грузоподъемности упорного подшипника качения.....	84
Королев А.В., Аничкин А.Н. Моделирование процесса нагрузок в кольцевых деталях	92
Королев А.В., Ивлишина И.М., Комиссаров А.И. Механизм разрушения деталей типа колец	96

Кривошеин Ю.А., Виноградов М.В. Анализ параметров многоступенчатых фрикционных передач прецизионного токарного модуля.....	100
Лускань О.А. Реализация исследований параметров движения грузов на импульсном тележечном конвейере в инженерном расчёте.....	105
Мелентьев В.А. Определение усилий комбинированного дорнования кольцевых заготовок.....	111
Митин С.Г., Бочкарёв П.Ю. Автоматизация проектирования технологических операций фрезерной обработки в условиях многономенклатурного производства.....	114
Пряхин И.В., Давиденко О.Ю. Повышение работоспособности подшипников качения путем нанесения покрытия на рабочие поверхности втирированием в процессе их совместной доработки в собранном виде.....	122
Седов Д.И., Насад Т.Г. Качество обработанной поверхности при высокоскоростной обработке с низкотемпературным охлаждением.....	126
Седов Д.И., Насад Т.Г. Экспериментальные исследования процесса высокоскоростной обработки с низкотемпературным охлаждением.....	129
Селиванов А.Н., Насад Т.Г. Расчет экономической эффективности обработки валов методом высокоскоростного фрезоточения.....	134
Селиванов А.Н., Насад Т.Г., Торманов С.Я. Экспериментальные исследования стружкообразования при обработке титанового сплава марки ВТ 1-0 методом высокоскоростного окружного фрезерования.....	138
Сигитов Е.А., Виноградов М.В. Перспективы применения многоступенчатых фрикционных передач для сверхпрецизионной обработки.....	144
Слитников К.Л., Данилов И.К., Беликов А.П. Планирование ремонтных циклов ДВС и оценка их трудоемкости сетевыми методами.....	150
Туркин М.В. Методика группирования деталей и оборудования для построения производственных ячеек замкнутого цикла.....	154
Шпилев В.В., Решетников М.К. Влияние факторов гидроабразивной резки на шероховатость обработанной поверхности, её твердость, овальность и конусообразность.....	160
Шпилев В.В., Решетников М.К., Берета Н.Н. Моделирование закручиваемой абразивной струи при гидроабразивном резании.....	163

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Котина Н.М., Жевалёв О.Ю., Куц Л.Е., Донец Е.А. Создание механически прочных соединений металлов с различными видами ферритов.....	168
Сперанский С.К., Сперанский К.С. Анализ плазменных покрытий с помощью метода главных компонент.....	170
Сперанский С.К., Сперанский К.С. Нанесение плазменных покрытий с использованием нечеткого регулятора.....	177
Шевченко С.М. Изменения концентрации углерода в поверхностном слое стали в процессе алмазно-искрового шлифования.....	182
Штейнгаузэр А.Б., Фомин А.А., Лясников В.Н. Оборудование и технология индукционно-термической обработки малогабаритных металлических изделий с биосовместимыми покрытиями.....	186

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Власов А.В., Игнатъев А.А. Оценка электромагнитных полей в операторах систем с распределенными параметрами.....	193
Демидов А.К. Моделирование типовых процессов металлообработки.....	199

Ефремова Т.А., Куликов Р.Е. Расчет гидродинамических характеристик электрического разряда в жидкости. Модель короткого цилиндра	203
Игнатьев С.А., Шабалина А.А. Система мониторинга технологического процесса с использованием САПР T-Flex	209
Игнатьев С.А., Шабалина А.А. Сравнительные характеристики систем автоматического проектирования для управления качеством продукции	213
Козлова Т.Д., Игнатьев А.А., Самойлова Е.М. Реализация экспертной системы поддержки принятия решений для определения неисправностей технологической системы	219
Комлева О.А., Игнатьев А.А. Моделирование магнитоэологического управляющего элемента в программном комплексе FEMLAB	225
Коновалов В.В., Игнатьев А.А. Модель процессов в динамической системе токарного станка с учетом стохастических свойств сил резания.....	230
Минаев Е.Н. Автоматизация систем защиты от коррозии на основе расчёта электрического поля при нелинейных граничных условиях	233
Набилкин А.Ю., Кравченко С.А., Гилев Г.А., Бирюков В.П. Компьютерная система измерения сил резания	248
Рожков И.А., Игнатьев А.А., Иващенко В.А. Совершенствование процесса распознавания дефектов шлифованных поверхностей колец подшипников	252
Садчикова Г.М. Системы управления технологическими процессами в производстве резинотехнических изделий	259
Самойлова Е.М., Игнатьев А.А. Интеллектуальные системы управления процессом формообразования с применением генетического алгоритма.....	263
Усакин К.С., Виноградов М.В. Аналого-цифровая система балансировки шпинделя прецизионного токарного модуля.....	267
Уткин Н.Н., Игнатьев А.А. Использование методов машинного обучения для виброакустического диагностирования динамической системы шлифовальных станков	271

ЭКОНОМИКА

Романова Л.И., Шамьенова Г.Р. Перспективы кадрового потенциала инновационного развития регионов России	276
---	-----

CONTENTS

Machine-building faculty: stages to stand and developments	9
---	---

MACHINE RELIABILITY

Anichkin A.N., Korolev A.V. Mechanism of shaping the mechanical characteristics of laminated details.....	11
Asoyan A.R. Deposition conditions is uniformly covered with electrolytic iron when restoring worn surfaces machine parts.....	19
Babenko M.G., Slesarev S.V., Babenko A.I. Measurement of residual pressure in the material of Technical objects the method of the probing aperture.....	21
Belov A.P., Bochkarev P.Yu. Perfection of technological preparation of manufacture on the basis of the establishment of interrelations between characteristics designet of elements of details and acceptance of design decisions by working out of technological processes	24
Bokova L.G. Structure assessment production details processability in the diversified mechanikal systems	28
Vinogradov A.N., Konstantinov R.A. Choice of rational technological modes to operations an bring balls on tool with new cinematics	32
Denisov A.S., Almeev R.I. The operating life improvement of crankshaft Bearings by pre-lubrication system usage	35
Denisov A.S., Asoyan A.R., Suhankin A.A. Analysis of stress-strain state of native supports the cylinder engine KAMAZ.....	38
Denisov A.S., Ivanov I.G. Change in status under the influence of packing of operating factors.....	41
Dobryakov V.A. Formalization of the estimation of the technical condition of machine tools as objects of the control, diagnosing and tests	45
Ermolcheva N.V., Korolyov A.V., Orlov B.S. Discrete vibrating device for cutting the establishment regular microrelief with the required parameters	52
Zemskov V.M. Modelling of movement of the vibrating tip for a moling of horizontal chinks	57
Ivanov A.A., Bochkarev P.Yu. Formalising of the optimal scheduling problem in multino-menclature production of machining process.....	61
Karakozova V.A., Ignatyev A.A. Choice of giving of the circle for quality maintenance processings of rings of bearings on the basis of identification of dynamic system of the grinding machine tool.....	69
Karacharovskiy V.Yu., Ryazanov S.A. Visualized estimation of parameters of the localised contact in worm gearing on the basis of 3D computer graphics methods application	74
Kozhuhovskaya L.Ya., Pavlova N.P. Criterion estimation of innovative transformations technologikal structures	77
Kozlov D.V., Ignatyev A.A. Experimental investigation of wheel dressing frequency.....	80
Korolev A.V. Investigation of the moment and static resistance to the rotation duty thrust bearing rolling	84
Korolev A.V., Anichkin A.N. Modeling of loads in ring detail	92
Korolev A.V., Ivlyushina I.M., Komissarov A.I. Mechanism of destruction details type of the rings.....	96
Krivoshein J.A., Vinogradov M.V. The analysis of parameters multistage friction gears of the precision turning module.....	100
Luskan' O.A. Realization of researches parameters movement cargoes on pulse cart conveyor in engineering calculation.....	106
Melentev V.A. Determination effort multifunction burnishing circular part blank	111
Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Automation of designing of technological operations of milling processing in the conditions of multinomenclature manufacturing	114

Pryahin I.V., Davidenko O.Y. Improving the efficiency bearings by the plating on the working surfaces by rubbing in their joint finalization in bodily.....	122
Sedov D.I., Nasad T.G. Quality of processing surface under speediest processing with low-temperature by cooling	125
Sedov D.I., Nasad T.G. Experimental researches of process of high-speed processing with lowtemperature cooling	129
Selivanov A.N., Nasad T.G. Calculation of economic efficiency of processing of shaft by the method high-speed turn-milling	134
Selivanov A.N., Nasad T.G., Tormanov S.Y. Data experimental research of process swaft formation in time cutting titanium alloy VT 1-0 by methods high speed circular milling	139
Sigitov E.A., Vinogradov M.V. Perspectives of application of multistage friction gears for superprecision handling	145
Slitnikov K.L., Danilov I.K., Belikov A.P. ICE (internal-combustion engine) service cycles simulation and their working hours evaluation by network methods.....	151
Turkin M.V. Machine part grouping methods for manufacturing cell formation	154
Shpilev V.V., Reshetnikov M.K. Impact of on waterjet cutting roughness of the machined surface, its hardness, oval and conical.....	160
Shpilev V.V., Reshetnikov M.K., Bereda N.N. Modeling twists abrasive jets for cutting waterjet.....	163

NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES

Kotina N.M., Zhevaley O.Yu., Kuts L.E., Donets E.A. Production of mechanically strong joints of metals with different types of ferrites	168
Speransky S.K., Speransky K.S. Principal component analysis of plasma-sprayed coatings	171
Speransky S.K., Speransky K.S. Plasma spraying coating, using fuzzy logic.....	178
Shevchenko S.M. Concentration changes of carbon in steel coating surface in the process of diamond-spaik grinding	182
Steinhauer A.B., Fomin A.A., Lyasnikov V.N. Equipment and technology for induction heating processing of small-sized metallic products with biocompatible coatings.....	186

AUTOMATION AND MANAGEMENT

Vlasov A.V., Ignatyev A.A. Estimation of electromagnetic fields in operators of systems with the distributed parameters	193
Demidov A.K. Simulation of standard processes of the metal working.....	199
Efremova T.A., Kulikov R.E. Calculation of hydrodynamic characteristics of the electric category in the liquid. Model of the short cylinder	204
Ignatyev S.A., Shabalina A.A. System of monitoring of technological process with use of system of automatic designing T-Flex.....	209
Ignatyev S.A., Shabalina A.A. Comparative characteristics of systems of automatic designing for product quality control	213
Kozlova T.D., Ignatyev A.A., Samoiloa E.M. Implementation of expert decision-making support systems for detecting irregularities technological system	219
Komleva O.A., Ignatyev A.A. Modeling of magneticreologic controlling element in femlab software complex.....	225
Konovalov V.V., Ignatyev A.A. Process model in dynamic lathe system with provision for tochastic characteristics of cutting power	230
Minaev E.N. Automatic control of cathodic protection system by calculation of electrical field with nonlinear boundary condition.....	233

Nabilkin A.Y., Kravchenko S.A., Gilev G.A., Birukov V.P. Computer system for measuring of cutting forces	248
Rozhkov I.A., Ignatiev A.A., Ivaschenko V.A. Perfection of process to recognition of defects of the polished of surfaces of rings of bearings.....	253
Sadchikova G.M. Control systems of technological processes in manufacture rubber technical of products.....	259
Samoilova E.M., Ignatyev A.A. Intelligent control system of the processes of formation using genetic algorithms	263
Usakin K.S., Vinogradov M.V. Analog-digital system of balancing of the spindle of the precision turning module.....	267
Utkin N.N., Ignatyev A.A. Machine learning methods use for dynamic system vibroacoustic diagnosing of the grinding machines	271

ECONOMICS

Romanova L.I., Shamjenova G.R. Prospects personnel potential of innovative development of the Russian regions.....	276
--	-----

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ: ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ

В тяжелые послевоенные годы, когда разрушенная войной страна ощущала острую потребность в инженерных кадрах машиностроительного профиля, принимается решение о создании в Саратовском автодорожном институте механико-технологического факультета. На момент открытия факультета в 1946 году в его состав входили всего три кафедры: «Технология металлов», «Дорожные и строительные машины» и выпускающая кафедра «Технология машиностроения».

Спустя три года с целью решения проблемы экономической подготовки производства, на факультете создается кафедра «Экономика и организация производства». В эти годы активизируется научно-исследовательская работа, создаются и оснащаются оборудованием научные и учебные лаборатории, приходят талантливые педагоги и ученые, закладываются фундаментальные основы преподавания технических дисциплин, зарождаются научные школы и направления, которые в последующие годы непрерывного развития превратятся в мощные источники технических идей, способных решить любые проблемы науки и производства.

К 1962 году в состав механико-технологического факультета, преобразованного в 1960 году в машиностроительный, уже входят шесть кафедр. Вновь созданы кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» и «Технология электровакуумного машиностроения». Вместо кафедры «Дорожные и строительные машины» организована кафедра «Детали машин».

В 1966 году с созданием кафедры «Автоматизация технологических процессов в машиностроении» на факультете завершается первый этап наиболее значимых структурных преобразований. В таком составе машиностроительный факультет успешно и стабильно работает более 20 лет.

В период становления факультета активно формировался кадровый состав высококвалифицированных педагогов и ученых, заложивших славные традиции преподавания специальных дисциплин и привнесших неповторимый дух энтузиазма и творчества в процесс педагогической работы. Доценты, к.т.н. К.И. Севров, Н.А. Шестериков, Я.М. Довгалецкий, А.И. Гильман, профессора, д.т.н. С.Г. Редько, К.М. Писманик, Г.Г. Иноземцев и др. широко использовали в учебном процессе результаты последних научных достижений, в том числе и собственных исследований, что позволяло студентам глубже усваивать материал и постепенно приобщаться к научной работе, ведущейся в исследовательских лабораториях. Такой подход к преподаванию сохранен на кафедрах факультета и по сегодняшний день.

Неоценимый вклад в создание и развитие факультета внес к.т.н., доцент П.И. Гаврилов, проработавший более 20 лет в должности декана. Под его руководством факультет приобрел тот статус, который и в настоящее время позволяет считать его одним из ведущих структурных подразделений нашего университета.

Один из самых тяжелых периодов в жизни факультета приходится на девяностые годы. В это время страна переживала наиболее болезненный и сложный этап фундаментальных изменений в государственном устройстве, которые повлекли за собой катастрофический спад промышленного производства и снижение потребности в инженерных кадрах. Понимая временность подобной ситуации, коллектив факультета активизировал профориентационную работу в школах и средних учебных заведениях. Возникла необходимость поиска новых нестандартных направлений работы с абитуриентами.

Важное значение приобрел анализ реальной потребности действующего производства в кадрах, а также прогнозирование направлений его дальнейшего развития. В этот период на кафедрах факультета открываются новые специальности и специализации, корректируется тематика научных исследований с целью обеспечения более тесной связи с современными народнохозяйственными проблемами. Эффективно решается проблема подготовки научно-педагогических кадров высшей квалификации. С этой целью на факультете организованы и активно работают под председательством профессора А.В. Королева и профессора В.Н. Лясникова два совета по защитах докторских и кандидатских диссертаций.

Решению факультетских проблем по всем направлениям значительное внимание уделяют Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», д.т.н., профессор Королев А.В., Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Электронное машиностроение и сварка», д.т.н., профессор Конюшков Г.В., Заслуженный работник высшего об-

разования РФ, заведующий кафедрой «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» д.т.н., профессор Бржозовский Б.М., Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Физическое материаловедение и технология новых материалов», д.т.н., профессор Лясников В.Н., заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами», д.т.н., профессор Игнатьев А.А., а также профессора кафедры д.т.н. Куранов В.Г., д.т.н. Дрогайцев В.С. и др.

Своевременно принятые меры позволили несколько смягчить объективные трудности и продолжить развитие факультета. Начиная с 1991 года, открыты такие специальности как «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки», «Биотехнические и медицинские аппараты и системы», «Проектирование технических и технологических комплексов», «Оборудование и технология сварочного производства». В этот период защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Дрогайцев В.С., Бржозовский Б.М., Боровских В.Е., Игнатьев А.А., Мартынов В.В., Давиденко О.Ю., Бочкарев П.Ю., Бекренев Н.В., Таран В.М., Шейко Л.И., Погораздов В.В., Бобырев С.В., Кочетков А.В., Королев А.А., Колокольцев В.А., Решетников М.К., Янкин И.Н., Васин А.Н.

Сегодня на факультете ведется подготовка специалистов по восьми специальностям: «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки», «Биотехнические и медицинские аппараты и системы», «Электронное машиностроение», «Технология машиностроения», «Проектирование технических и технологических комплексов», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Металлообрабатывающие станки и комплексы», «Оборудование и технология сварочного производства».

В соответствии с международными стандартами факультет готовит бакалавров и магистров по восьми направлениям: «Материаловедение и технология материалов», «Металлургия», «Машиностроение», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Технологические машины и оборудование», «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Биотехнические системы и технологии», «Электроника и наноэлектроника». По заказу оборонно-промышленного комплекса открыта новая специальность «Проектирование технических машин и комплексов».

Высокий уровень подготовки специалистов обусловлен наличием квалифицированных кадров, а также современного учебно-лабораторного оборудования. На факультете открыты четыре компьютерных класса, работающих на базе высокоэффективного программного обеспечения, межфакультетская учебно-научная лаборатория материаловедения, оснащенная последними образцами компьютерной техники.

Научно-исследовательская работа сотрудников факультета осуществляется в самых различных направлениях техники и технологий. Весомые результаты достигнуты в области совершенствования конструкций и технологий изготовления деталей опор качения и изделий электронного машиностроения, стоматологической имплантологии, триботехники, мониторинга сложных технических систем, автоматизированных систем контроля и проектирования, изготовления зубчатых зацеплений.

В настоящее время эффективно развиваются научно-производственные связи с ведущими предприятиями г. Саратова: ОАО «Саратовский подшипниковый завод», ОАО «СЭПО», ОАО «ТАНТАЛ», ОАО «Саратовский агрегатный завод», ОАО «САПКОН-Нефтемаш», ФГУП «Корпус» и др.

Ежегодно более 200 хорошо подготовленных молодых инженеров-машиностроителей приходят из студенческих аудиторий на промышленные предприятия г. Саратова. Им предстоит решать сложные производственные задачи в самых различных отраслях техники. И, я уверен, они с ними справятся, потому что их этому учили замечательные педагоги нашего факультета.

Декан машиностроительного факультета,
доктор технических наук, профессор

О.Ю. Давиденко

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.778

А.Н. Аничкин, А.В. Королев**МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МНОГОСЛОЙНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Описан механизм формирования механических свойств многослойных деталей и приведен расчет многослойных деталей. В машиностроении детали редко изготавливаются составными из-за их высокой стоимости. Более высокие технологические показатели имеют детали, состоящие из многих слоев материала. Однако использование таких многослойных изделий в технике на данный момент невелико. Ниже приведены описание и расчет остаточных напряжений в многослойных деталях, изготовленных навивкой из металлической ленты.

Многослойные детали, механические свойства, лента

A.N. Anichkin, A.V. Korolev**MECHANISM OF SHAPING THE MECHANICAL
CHARACTERISTICS OF LAMINATED DETAILS**

This paper describes the mechanism of the mechanical properties of multilayer components and results of the calculation of multilayer of details lei. In the engineering details are rarely made components because of their high cost. Higher technological indicators have details, consisting of many layers of material. However, the utilization of the product in such multilayer technology does not currently lead-to. Below is a description and calculation of residual stresses in multilayer parts made of wound metal strip.

Laminated details, mechanical characteristics, tape

В настоящее время наряду с традиционными путями уменьшения материалоемкости имеются принципиально новые конструкторско-технологические направления.

Первое направление – навитые тонкостенные детали машин: валы, цилиндры, подшипники, кольца, втулки, муфты, корпуса и ленточные технологии их изготовления. При уменьшении материалоемкости деталей из ленты в два с лишним раза трудоемкость их изготовления снижается более чем в 5 раз.

Второе направление – пластинчато-листовые упругие исполнительные механизмы: кулачковые, передаточные, фиксирующие, отсекающие, распределяющие, хватающие и др.

Третье направление – оболочковые.

Четвертое – проволочно-стержневые детали, механизмы и инструменты и технологии их производства.

Наиболее пригодными к изготовлению по ленточным и пластинчато-листовым технологиям являются тонкостенные тела вращения, подшипники, корпусные детали и профиле-но-оболочковые детали, они приобретают высокую жесткость и высокие рабочие свойства.

Для определения прочностных свойств многослойных кольцевых деталей рассмотрим схему, приведенную на рис. 1. Деталь состоит из нескольких слоев, число которых равно n , все слои имеют равную толщину d и ширину h .

Деталь изготовлена следующим образом. На цилиндрическую оправку с радиусом r_v с определенным натягом Δr_v напрессовывается кольцо, составляющее первый внутренний слой детали. На это кольцо с натягом Δr_2 запрессовывается второе кольцо и так далее последовательно каждое последующее кольцо с натягом Δr_i запрессовывается на предыдущее кольцо, образуя i -й слой детали.

Величина натяга в каждом слое детали определяется зависимостью

$$\Delta r_i = \Delta r_v \cdot i^k, \tag{1}$$

где k – произвольный показатель степени.

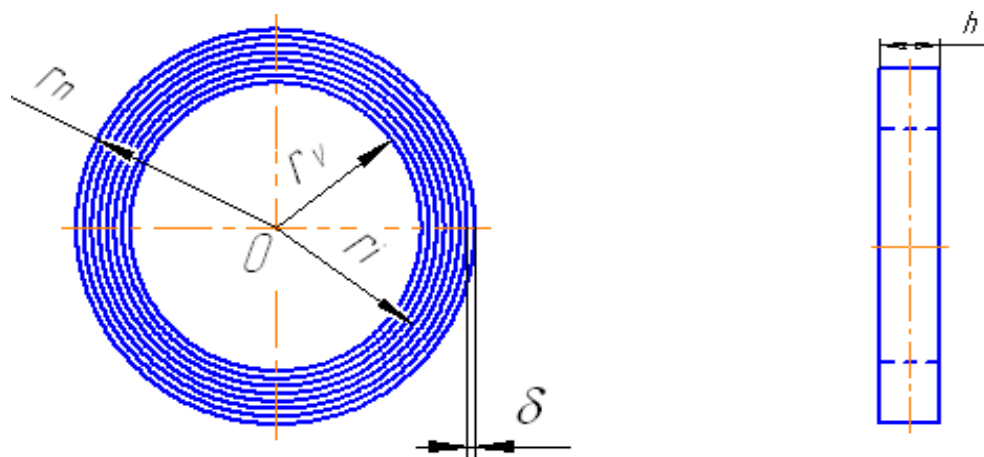


Рис. 1. Схема многослойной детали

Между слоями детали образуется контактное напряжение s_{mi} . Так как толщина каждого витка мала по сравнению с его радиусом, расчет напряжений в каждом слое будем производить на основе безмоментной теории оболочек.

Выделим в данном слое элемент, представленный на рис. 2, на который действуют нормальные напряжения. Обозначим через s_t нормальные растягивающие напряжения, направленные вдоль окружности детали, а через s_m – нормальные напряжения, направленные вдоль ее оси.

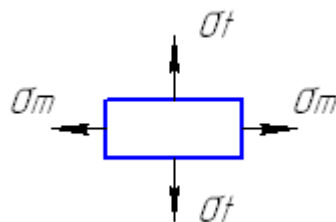


Рис. 2. Элемент поверхности произвольного витка кольца

В соответствии с уравнением Лапласа

$$\frac{S_{ii}}{r_i} + \frac{S_m}{r_m} = \frac{S_{ni}}{d}, \quad (2)$$

где r_m – радиус поперечного сечения слоя; r_i – радиус средней окружности i -го слоя.

Для слоя, имеющего цилиндрическую форму, $r_m = \infty$. Поэтому из равенства (2) получим

$$S_{ni} = \frac{S_{ii}}{r_i} \cdot d. \quad (3)$$

Из равенства (3) видно, что контактное напряжение между слоями даже при одинаковом натяге слоев различно и оно уменьшается по мере возрастания радиуса.

Из [1] несложно определить, что нормальные напряжения вдоль окружности слоя зависят от величины натяга:

$$S_{ii} = \frac{\Delta r_i}{r_i} \cdot E \cdot K(r_i), \quad (4)$$

где

$$K(r_i) = \frac{1}{1 + m \cdot \frac{r_n^2 - r_i^2}{r_n^2 + r_i^2}}. \quad (5)$$

Радиус витка зависит от его номера:

$$r_i = r_v + d \cdot (i - 1), \quad (6)$$

Подставляя (1), (4) и (6) в выражение (3), получим: $\Delta r_i = \Delta r_v \cdot i^k$

$$S_{ni} = \frac{\Delta r_v \cdot i^k}{(r_v + d \cdot i)^2} \cdot d \cdot E \cdot K(i), \quad (7)$$

где

$$K(i) = \frac{1}{1 + m \cdot \frac{r_n^2 - (r_v + d \cdot i)^2}{r_n^2 + (r_v + d \cdot i)^2}}. \quad (8)$$

На рис. 3 показана зависимость величины окружных напряжений в различных слоях детали, построенная из выражения (4), от порядкового номера витка и значений показателя k . При этом использовались следующие условия: $r_v = 35$ мм; $d = 0,3$ мм; $n = 16$; $\Delta r_1 = 0,077$ мм.

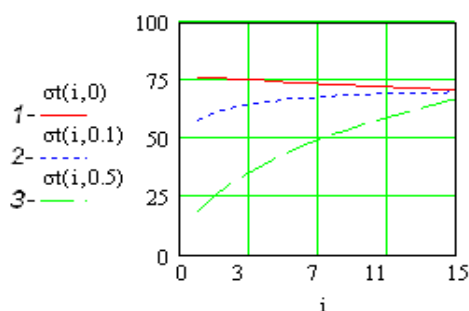


Рис. 3. Зависимость окружных напряжений в слоях детали в зависимости от их порядкового номера при $k = 0$ (линия 1), $k = 0.1$ (линия 2) и при $k = 0.5$ (линия 3)

Как видно, напряжения между слоями в наружной части детали получаются существенно выше, чем во внутренней части, особенно при малых соотношениях радиуса детали и толщины слоев.

Большой практический интерес представляет состояние детали в свободном состоянии, т.е. после ее снятия с оправки. Каждый виток после снятия детали с оправки будет уменьшаться в диаметре и тем самым освобождаться от растягивающих напряжений S_i .

В соответствии с [1] упругая деформация витка определяется зависимостью

$$\Delta r_i = \frac{\Delta S_{ii}}{E} \cdot \frac{r_v + d \cdot i}{\Delta r_v \cdot K(r_i) \cdot i^k}, \quad (8)$$

где E – модуль упругости материала ленты; ΔS_{ii} – величина изменений упругой деформации i -го витка.

Если, например, в результате свободной деформации слоев окружные напряжения в каком-то из них полностью устраняются, то $\Delta S_{io} = S_{ii}$. Для этого слоя из (8) следует

$$\Delta r_o = -\Delta r_i. \quad (9)$$

При условии неразрывности контакта витков их радиальная деформация должна осуществляться на одинаковую величину ($\Delta r_o = \Delta r = const$). Тогда из выражения (8) следует, что остаточные растягивающие S_{toi} и контактные S_{noi} напряжения во всех витках неодинаковы и определяются из выражений:

$$S_{toi} = \frac{\Delta r_i - \Delta r_o}{r_i} \cdot E \cdot K(r_i); \quad (10)$$

$$S_{noi} = \frac{\Delta r_i - \Delta r_o}{r_i^2} \cdot d \cdot E \cdot K(r_i).$$

Подставляя в выражение (10) значения Δr_i и r_i , выраженные через порядковый номер слоя, получим

$$S_{toi} = \frac{\Delta r_v \cdot i^k - \Delta r_o}{r_n} \cdot E \cdot K(r_i); \quad (11)$$

$$S_{noi} = \frac{\Delta r_v \cdot i^k - \Delta r_o}{r_n^2} \cdot d \cdot E \cdot K(r_i).$$

Для окончательного определения остаточных напряжений в детали после снятия ее с оправки необходимо найти радиальную деформацию Δr всех витков. Величину этой деформации найдем из условия равенства нулю суммарной потенциальной энергии деформации всех витков.

Энергия деформации i -го слоя определяется на основе теоремы Клапейрона:

$$u_i = \frac{S_{toi}^2}{2 \cdot E} \cdot v_i, \quad (12)$$

где v_i – объем витка, равный

$$v_i = 2 \cdot p \cdot d \cdot h \cdot r_i.$$

Раскрывая в (12) значение объема слоя и величины напряжений (11), найдем

$$u_i = p \cdot \frac{(\Delta r_v \cdot i^k - \Delta r_o)^2}{r_n} \cdot d \cdot h \cdot E \cdot K(i)^2. \quad (13)$$

Микропроскальзывания между слоями при деформации детали отсутствуют, поэтому на трение энергия не расходуется.

Полная потенциальная энергия деформации детали определится суммой энергий всех ее витков. Используя выражение (13), после преобразования определим

$$U = p \cdot d \cdot h \cdot E \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta r_v \cdot i^k - \Delta r_o)^2}{r_n} \cdot K(i)^2. \quad (14)$$

Обозначим слой, в котором в свободном состоянии детали напряжения равны нулю, через i_o . Тогда на основе равенства (1) после преобразований приведем выражение, стоящее в равенстве (14) под знаком суммы, к безразмерному виду:

$$U = p \cdot d \cdot h \cdot E \cdot \frac{\Delta r_v^2}{r_v} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(i^k - i_o^k)^2}{1 + \frac{d}{r_v} \cdot (i-1)} \cdot K(i)^2. \quad (15)$$

Из выражения (15) видно, что при $k = 0$, т.е. когда формирование слоев осуществляется с одинаковым натягом, энергия свободной деформации детали равна нулю. При значениях k , отличных от нуля, энергия деформации детали зависит от величины i_o .

В качестве примера на рис. 4 показана зависимость энергии свободной деформации детали в зависимости от значения i_o при различных значениях k и условий предыдущего примера. Как видно из рис. 3, энергия свободной деформации детали существенно зависит от значения i_o и носит экстремальный характер.

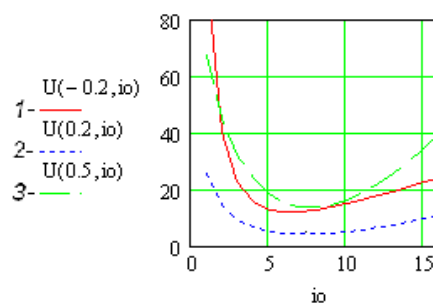


Рис. 4. Зависимость энергии деформации детали $U(k, i_o)$ от значений k и i_o

Как при отрицательных значениях величины k , при котором натяг слоев уменьшается с увеличением их порядкового номера, так и при положительных значениях k , при которых натяг от слоя к слою возрастает, наименьшее значение энергии свободной деформации детали имеет место в случаях, когда наиболее разгруженный слой является слой, расположенный ближе к среднему слою детали.

Выражение (15) при различных значениях i_o имеет минимум при минимальном значении суммы правой части этого равенства. Следовательно, величину i_o можно определить из условия:

$$\sum_{i=1}^n \frac{(i^k - i_o^k)^2}{1 + \frac{d}{r_v} \cdot (i-1)} \cdot K(i)^2 = \min. \quad (16)$$

К сожалению, равенство (16) в явных функциях не выражается. Если бы величина i была непрерывна, то суммирование в равенстве (16) можно было бы заменить интегрированием и задача определения значения i_o решалась бы сравнительно просто. Надо было бы под знаком интегрирования продифференцировать подынтегральное выражение и затем полученное равенство приравнять нулю.

Так как величина i на самом деле является дискретной, поступим следующим образом. Примем величину i_o за непрерывную и присвоим ей значение x . Продифференцируем выражение под знаком суммы по переменной x . При этом получим

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial i_o} \left(\frac{(i^k - x^k)^2}{1 + \frac{d}{r_v} \cdot (i-1)} \cdot K(i)^2 \right) = -2 \cdot k \sum_{i=1}^n \frac{(i^k - x^k) \cdot x^{k-1}}{1 + \frac{d}{r_v} \cdot (i-1)} \cdot K(i)^2 = 0. \tag{17}$$

Из равенства (17) видно, что значение суммы равно нулю при $x = 0$. Но такого значения быть не может, так как минимальное значение i_o равно единице. Но так как $x \neq 0$, разделим выражение (17) на x^{k-1} и приведем его к следующему виду:

$$\sum_{i=1}^n \frac{(i^k - x^k)}{1 + \frac{d}{r_v} \cdot (i-1)} \cdot K(i)^2 = 0. \tag{18}$$

Из (18) находим

$$x = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{i^k}{1 + \frac{d}{r_v} \cdot (i-1)} \cdot K(i)^2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + \frac{d}{r_v} \cdot (i-1)} \cdot K(i)^2} \right)^{\frac{1}{k}}. \tag{19}$$

Значение x с любой заданной точностью легко найти численными методами. Тогда

$$i_o = \begin{cases} n & \text{при } x > n; \\ 1 & \text{при } x < 1; \\ \text{ceil}(x) & \text{при } 1 < x < n. \end{cases} \tag{18}$$

Таблица значений i_o

d/r_v	Число слоев n														
	5	7	9	1	1	1	3	1	5	1	7	1	9	2	1
$k=-0,5$															
0,003	3	4	4	5	5	6	7	7	8	8	7	7	7	8	8
0,03	3	3	4	5	5	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
$k=-0,2$															
0,003	3	4	4	5	6	7	7	8	9	9	8	8	8	9	9
0,03	3	4	4	5	6	6	7	7	7	7	7	7	7	8	8
$k=0,2$															
0,003	3	4	5	6	6	7	8	9	1	0	1	0	1	1	0
0,03	3	4	5	5	6	7	8	8	8	8	8	8	8	9	9
$k=0,5$															
0,003	3	4	5	6	7	8	9	1	0	1	0	1	1	1	1
0,03	3	4	5	6	7	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9

Проверку на экстремум делать не имеет смысла. Так, из рис. 4 видно, что зависимость потенциальной энергии свободной деформации детали от величины i_o носит экстремальный характер.

В таблице приведены значения i_o при различных соотношениях толщины слоев к радиусу кольца и различных значениях показателя степени k .

Из таблицы видно, что с достаточной для практики точностью значение i_o можно принять равным $i_o = 0,5n$.

Таким образом, мы получили искомые зависимости для расчета остаточных напряжений в детали, изготовленной из многослойного материала. Исследования показали, что регулируя значение k при формировании слоев детали, можно существенно влиять на ее прочностные свойства.

На рис. 5 в качестве примера приведены расчетные по формуле (11) значения окружных напряжений в детали после ее снятия с оправки для условий предыдущих примеров.

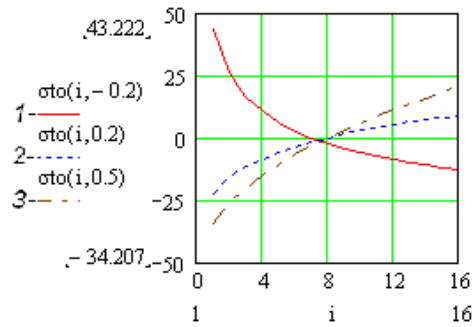


Рис. 5. Распределение окружных напряжений в многослойной детали при $k = -0,2$ (линия 1), $k = 0,2$ (линия 2) и $k = 0,5$ (линия 3)

Как видно из рис. 5, во внутренних слоях детали напряжения, направленные вдоль окружности, при положительных значениях k являются напряжениями сжатия, а в наружных слоях образуются напряжения растяжения. Так как в большинстве практических случаев наиболее опасными для разрушения детали являются напряжения растяжения, следовательно, к такой детали можно прикладывать повышенные нагрузки, действующие в ее отверстии.

Отрицательные значения k практического смысла не имеют, так как при снятии детали с оправки деформация наружных слоев получается меньше деформации внутренних слоев и между слоями образуется зазор. Условие сплошности детали нарушается.

Приложим к поверхности отверстия детали давление p . Тогда в произвольном i -м слое детали возникнет нормальное напряжение, равное

$$s_{npi} = s_{noi} + p. \tag{19}$$

Соответствующее (19) окружное напряжение примет следующую величину:

$$s_{tpi} = \frac{s_{noi} + p}{d} \cdot r_i. \tag{20}$$

Раскрывая в (20) значение s_{noi} (11), после преобразования получим

$$s_{tpi} = \Delta r_v \cdot \frac{i^k - i_o^k}{r_n} \cdot E \cdot K(r_i) + p \cdot \frac{r_i}{d}. \tag{21}$$

Растягивающее окружное напряжение, как правило, является наиболее опасным при эксплуатации детали. Так как у многослойной детали наибольшее растягивающее напряжение возникает в верхнем слое, этот слой является наименее прочным. Поэтому, если допустимое окружное напряжение равно $[s_t]$, из (21) найдем допустимое давление на отверстие детали:

$$p = \frac{d}{r_n} \cdot (s_{tpn} - \Delta r_v \cdot \frac{n^k - i_o^k}{r_n} \cdot E). \tag{22}$$

Так как при положительном значении k величина натяга от слоя к слою возрастает (1), натяг в первом слое должен рассчитываться из условия, при котором в последнем слое не возникнет напряжение, превышающее предел текучести: $\Delta r_v(k, n) = \frac{S_m \cdot r_n}{E \cdot n^k}$

$$\Delta r_v \leq \frac{S_m \cdot r_n}{E \cdot n^k}. \quad (23)$$

Как известно [1], для толстостенной детали наиболее опасным является окружное напряжение, действующее в отверстии детали и равное

$$p_s = [S_t] \cdot \frac{r_v^2 - r_n^2}{r_v^2 + r_n^2}. \quad (24)$$

Заключение. Выполненные исследования позволяют целенаправленно осуществлять проектные работы по изготовлению многослойных кольцевых деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов / В.И. Феодосьев. М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 593 с.
2. Биргер И.Ф. Прочность, устойчивость, колебание: в 2 т. / И.Ф. Биргер. М.: Машиностроение, 1988. 456 с.

Аничкин Александр Николаевич – аспирант кафедры «Технологии машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Anichkin Aleksander Nikolaevich – post-graduate faculty «Technology of mechanical engineering» Saratov State Technical University

Королев Альберт Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Korolev Albert Viktorovich – Doctor of technical sciences, professor, head. Department «Technology of mechanical engineering» Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 04.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.357.7.019

А.Р. Асоян

УСЛОВИЯ ОСАЖДЕНИЯ РАВНОМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Рассмотрены вопросы, связанные с равномерностью распределения электролитических осадков железа на поверхности восстанавливаемых деталей. Определены основные факторы, влияющие на равномерность распределения осадков электролитического покрытия при восстановлении деталей машин.

Восстановление деталей, равномерность покрытия, электролитическое железо

A.R. Asoyan

DEPOSITION CONDITIONS IS UNIFORMLY COVERED WITH ELECTROLYTIC IRON WHEN RESTORING WORN SURFACES MACHINE PARTS

The paper discusses issues related to the uniformity of electrolytic deposits of iron, on the surface of the recovered parts. Identifies the main factors affecting the uniformity of distribution of rainfall in the recovery of the electrolytic coating of machine parts.

Restore the detail and regularity coating, electrolytic iron

Количество металла, осаждаемого на поверхность детали, зависит от количества электричества, прошедшего через электролит, а следовательно, от силы тока и времени электролиза. Если плотность тока одинакова на всех участках поверхности детали, то и толщина покрытий будет равномерной. Как известно, неравномерность распределения силовых линий в ванне в процессе электролиза, а также сопутствующий процесс выделения водорода на деталях не позволяют обеспечивать одинаковую плотность тока на поверхности детали. Это приводит к неравномерной толщине электролитического покрытия. С электрохимической точки зрения падение потенциала складывается из омического падения потенциала в растворе, концентрационного перенапряжения и химического перенапряжения, связанного с энергией активации катодного и анодного процессов. Первые слагаемые характеризуют падение потенциала в объеме электролита. Концентрационное падение потенциала возникает вследствие изменения концентрации в объеме электролита. Последнее слагаемое представляет падение потенциала на самой поверхности электрода, точнее, в двойном электрическом слое на границе электрод-электролит.

Электродвижущая сила, приложенная между электродами, определяется выражением

$$V = \Delta \varphi_{\text{равн}} + \Delta \varphi_{\text{ом}} + \eta_{\text{конц}} + \eta_{\text{хим.}}, \quad (1)$$

$\Delta \varphi_{\text{равн}}$ – равновесный потенциал относительно выбранного электрода сравнения; $\Delta \varphi_{\text{ом}}$ – омическое падение потенциала; $\eta_{\text{конц}}$ – концентрационное перенапряжение; $\eta_{\text{хим}}$ – «химическое» перенапряжение, т.е. перенапряжение, связанное с приемом и отдачей электронов.

Всю цепь можно представить как последовательное включение линейного и двух нелинейных элементов. Линейным элементом является раствор с постоянной концентрацией; нелинейными элементами служат раствор с переменной «концентрацией» и «область электрохимической реакции».

Распределение потенциала в электролите определяется наибольшим из трех слагаемых. Обычно не все они имеют одинаковый порядок величин. Омическое сопротивление W_0 сравнительно велико в электролизерах больших размеров. Оно определяется исключительно геометрическими размерами и формой электролизера, а также электропроводимостью электролита с постоянной концентрацией.

Как следует из теорий конвективной диффузии [3], если ток, текущий через электролизер, мал по сравнению с предельным диффузионным током, то изменением концентрации токопроводящих ионов в нем можно пренебречь и считать, что приложенная к электролизеру разность потенциалов равна сумме омического падения потенциала и «химического» перенапряжения. Можно предположить, что раствор электролита обладает постоянной электропроводностью, а распределение тока в растворе искать из решения чисто электрической задачи. В том случае, если ток в электролизере сравним с предельным диффузионным током, концентрационное перенапряжение резко увеличивается и приобретает ведущую роль в процессе электролиза. При этом влияние электрических и химических факторов на суммарную скорость процесса оказывается второстепенным и величина тока, идущего через электроли-

зер, будет определяться быстротой доставки ионов к поверхности катода. Последняя определяется на практике обычно гидродинамическим режимом размешивания электролита.

При отсутствии концентрационного перенапряжения, когда размеры катода достаточно малы, распределение плотности тока на поверхности определяется ходом электрохимической реакции. Поскольку для хода все точки катода равноценны, плотность тока оказывается постоянной на поверхности.

В обратном предельном случае, имеющем место при весьма больших линейных размерах электрода, распределение плотности тока на катоде не зависит от электрохимической стадии реакции.

Плотность катодного тока D_k может быть выражена уравнением диффузионной кинетики

$$D_k = Z * F * D / s * (C_0 - C), \quad (2)$$

где Z – заряд иона; F – число Фарадея; D – коэффициент диффузии; s – толщина диффузионного слоя; C_0 – концентрация ионов в объеме электролита; C – концентрация ионов в прикатодном слое электролита.

Рост разности $C_0 - C$ при постоянном значении s приводит к увеличению диффузионного тока. Если скорость электродной реакции велика, то C стремится к нулю (каждый ион приближающийся к электроду немедленно вступает в реакцию). В этом случае D_k принимает наибольшее возможное при данной величине C_0 значение

$$D_k = Z * F * D / s * C_0. \quad (3)$$

В неподвижном электролите толщина диффузионного слоя будет постоянно расти и постепенно этот слой распространяется на всю толщину электролита. Однако обеспечить неподвижность электролита невозможно. Электродный процесс, приводящий к изменению концентрации электролита, около электрода служит причиной, вызывающей движение электролита. При восстановлении катионов металла с образованием осадка изменяется плотность электролита, что вызывает изменение характера диффузионного слоя и конвекционный поток электролита. Движение электролита относительно электрода стабилизирует толщину диффузионного слоя и делает ее меньше. В связи с этим нельзя рассматривать диффузионный слой как неподвижный. В диффузионном слое сохраняется еще движение электролита относительно поверхности электрода, но растворенное в нем вещество переносится за счет молекулярной диффузии, а не за счет движения электролита. В общем случае толщина диффузионного слоя s составляет некоторую часть толщины слоя Прандтля. Из вышерассмотренного анализа вытекают важные выводы для обеспечения получения равномерных покрытий электролитического железа по всей длине восстанавливаемой поверхности.

Во-первых, равномерность электролитических покрытий металлов, в том числе и железа, на деталях различных размеров и конфигураций может быть обеспечена на основании расчета геометрических параметров между деталями и анодами и стенками электролизера, исходя из решения чисто электрической задачи.

Во-вторых, равномерность электролитических покрытий металлов на деталях может быть обеспечена при условии создания диффузионного слоя равномерной толщины. Исходя из гидродинамического движения электролита, условие равномерности покрытия будет соблюдено, если ток электролиза будет находиться между полупредельным ($i_{пр.}$) и предельным токами ($i_{пр.}$).

В-третьих, стремление проводить процесс электроосаждения металлов при предельных токах приводит к уменьшению толщины покрытия металлов в связи с началом образования зародышей дендритов на растущей поверхности покрытия. И последнее: на равномерность электролитических покрытий могут оказывать существенное влияние выделяющиеся на катоде в процессе электролиза пузырьки водорода, которые не только уменьшают электропроводность электролита, но и сокращают истинную поверхность, на которой осаждается металл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. М.: Физматлит, 1959. 99 с.
2. Каданер Л.И. Равномерность гальванических покрытий / Л.И. Каданер. Харьков: Изд-во Харьков. ун-та, 1961. 414 с.
3. Электролитическое осаждение железа / Ю.Н. Петров и др. Кишинев: Изд-во АН Молд. ССР, 1990. 194 с.

Асоян Артур Рафикович –
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Автомобили и автомобильное
хозяйство» Саратовского государственного
технического университета

Asoyan Artur Rafikovich –
Candidate of Technical Sciences, the senior
lecturer of chair «Automobiles and automobile
sector» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.06.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 535.417, 544.034.23

М.Г. Бабенко, С.В. Слесарев, А.И. Бабенко

ИЗМЕРЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ЗОНДИРУЮЩЕГО ОТВЕРСТИЯ

Представлена классификация способов определения остаточных напряжений методами неразрушающего контроля. Приведены критерии выбора оптимального метода неразрушающего контроля. Описан способ определения остаточных напряжений на основе лазерной интерферометрии.

Остаточные напряжения, методы контроля, лазер

M.G. Babenko, S.V. Slesarev, A.I. Babenko

MEASUREMENT OF RESIDUAL PRESSURE IN THE MATERIAL OF TECHNICAL OBJECTS THE METHOD OF THE PROBING APERTURE

In article classification of ways of definition of residual pressure by methods of nondestructive control is presented. Criteria of a choice of an optimum method of nondestructive control are presented. The way of definition of residual pressure on the basis of a laser interferometry is described.

Remaining voltages, methods of checking, lazer

Разработка методов измерения остаточных напряжений в настоящее время является насущной и актуальной задачей. Именно из-за отсутствия удобных и быстрых способов измерений решение проблемы остаточных напряжений отстает от аналогичной для напряженных состояний под действием активных нагрузок. Однако в последние десятилетия в результате усилий ученых России, Украины, США, Германии, Англии, Венгрии и других стран положение с измерительными методами и средствами существенно улучшилось и началось ак-

тивное экспериментальное изучение таких напряженных состояний. Но многое еще не сделано: для получения общих выводов о влиянии остаточных напряжений на прочность конструкций предстоит исследовать напряжения в очень большом объеме материалов и изделий. Необходимо аттестовать технологические операции по тому напряженному состоянию, какое они вносят в готовое изделие, уметь оценивать значение этого состояния и находить способы управления технологическими процессами и вызываемыми ими напряжениями для улучшения качества изделий и надежности их работы.

Методы неразрушающего контроля базируются на наблюдении, регистрации и анализе результатов взаимодействия физических полей (излучений) или веществ с объектом контроля, причем характер этого взаимодействия зависит от химического состава, строения, состояния структуры контролируемого объекта и т.п.

Все методы неразрушающего контроля являются косвенными методами.

Методы разрушающего контроля базируются на создании локального дефекта поверхностного слоя в материале технических объектов, регистрации и анализе результатов взаимодействия физических полей (излучений) или веществ с объектом контроля. Одним из таких является способ вихревыми дефектоскопами. Метод визуально нагляден, но не имеет количественного подтверждения [6].

Наиболее эффективным способом регистрации перемещений в окрестности зондирующего отверстия является способ лазерной интерферометрии. В основе этого способа лежит интерферометрическая регистрация малых перемещений, возникающих в окрестности несквозного отверстия, просверленного в исследуемой зоне материала объекта контроля с остаточными напряжениями по [3].

Обработку результатов измерений проводят с помощью специализированной программы создания и обработки электронных спекл-интерферограмм.

Обработанная спекл-интерферограмма обычно представляет собой симметричную систему полос, число которых пропорционально значениям главных напряжений σ_1 и σ_2 , существовавших в этом месте объекта до высверливания отверстия, а ориентация осей симметрии системы полос совпадает с направлениями β, γ главных напряжений относительно выбранной системы координат x, y, z .

В случае измерения нормальных перемещений число полос N , сосчитанное по какому-либо направлению от центра отверстия, длина волны λ и перемещение w кромки отверстия связаны формулой

$$w = N \frac{\lambda}{2}. \quad (1)$$

Перемещения кромки отверстия связаны с уровнем остаточных напряжений в окрестности зондирующего отверстия, который определяется из решения соответствующей задачи теории упругости, заложенной в специализированную программу, или приближенно (при $\sigma < 0,4\sigma_T$) для целей экспресс-анализа по формуле

$$\sigma = \left(A - \frac{B}{h} \right) \frac{D_0}{D} \frac{E}{E_A} N, \quad (2)$$

где A и B – аппроксимирующие константы: ($A = 30$ МПа, $B = 10$ МПа, мм); D_0 – эталонный диаметр, равный 2 мм; E – модуль упругости (Юнга), ГПа; E_A – модуль упругости алюминия, равный 70 ГПа; D, h – диаметр и глубина зондирующего отверстия, мм.

Погрешность СИ определяется точностью определения микроперемещений поверхности тела в окрестности зондирующего отверстия.

При проведении экспресс-анализа число полос визуально определяют по интерферограмме с точностью $\pm 0,5$ полосы. Возникающая при этом абсолютная погрешность определения напряжений зависит от модуля упругости материала исследуемого объекта и параметров отверстия и определяется по приближенной формуле

$$\Delta\sigma = \left(A - \frac{B}{h} \right) \frac{D_0}{2D} \frac{E}{E_A}. \quad (3)$$

Примечание. Максимальная погрешность имеет место при минимальном внедрении, в материал, например при $h = 1$ мм, $D = 4$ мм погрешность измерения составляет 10 МПа для алюминия и сплавов на его основе и 30 МПа для сталей. С увеличением глубины и диаметра зондирующего отверстия погрешность измерения данным методом соответственно снижается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
2. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак и др. Киев: Наукова думка, 1981, 584 с.
3. Островский Ю.И. Голографическая интерферометрия / Ю.И.Островский, М.М. Бутусов, Г.В. Островская. М.: Наука, 1977. 399 с.
4. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г.Н. Чернышев, А.Л.Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев. М.: Машиностроение. 1996. 220 с.
5. Экспериментальная механика / пер. с англ.; под ред. А. Кобаяси. М.: Мир, 1990. 480 с.
6. Болкунов В.В. О возможности оценки напряжённого состояния деталей машин вихретоковыми дефектоскопами / В.В. Болкунов, Р.А. Гребнев // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: межвуз. ауч. сб. Саратов: СГТУ, 2007. С. 92-95.

Бабенко Марина Геннадиевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Слесарев Сергей Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Бабенко Андрей Игоревич – аспирант кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета

Babenko Marina Gennadievna – Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of «Designing technical and technological complex» of Saratov State Technical University

Slesarev Sergei Valentinovich – Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of «Designing technical and technological complex» of Saratov State Technical University

Babenko Andrei Igorevich – post-graduate student of «Automobiles and automobile sector» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 11.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 681.587.344.7

А.П. Белов, П.Ю. Бочкарев

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА
НА ОСНОВЕ УСТАНОВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ И ПРИНЯТИЕМ ПРОЕКТНЫХ
РЕШЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Показана перспективность применения проектирования технологического процесса с учётом взаимосвязей между конструктивными элементами деталей и технологическим процессом их изготовления.

Размерные связи, теория графов, конструктивные элементы

A.P. Belov, P.Yu. Bochkarev

**PERFECTION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF MANUFACTURE
ON THE BASIS OF THE ESTABLISHMENT OF INTERRELATIONS BETWEEN
CHARACTERISTICS DESIGNET OF ELEMENTS OF DETAILS AND ACCEPTANCE
OF DESIGN DECISIONS BY WORKING OUT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES**

Perspectivity of application of designing of technological process with the account of interrelations between constructive elements of details and technological process of their manufacturing is shown.

Dimensional communications, the theory of counts, constructive elements

Производственные задачи усложняются и становятся более наукоёмкими, требования к качеству их решения возрастают, сроки решений сокращаются, возникает необходимость принятия эффективных решений в минимальные сроки. Современное машиностроительное производство характеризуется постоянным ростом требований к качеству выпускаемой продукции и усложнением задач по его обеспечению, повышением гибкости, т.е. смены номенклатуры выпускаемых изделий, что обуславливает необходимость сокращать сроки технологической подготовки производства. Упрощение решения таких задач осуществимо с помощью автоматизации производственного процесса [1, 2].

Автоматизация проектирования технологического процесса (ТП) может быть осуществима следующим образом; при заданной (и введенной в автоматизированную систему) информации о конструктивно-технологических параметрах предмета производства (детали, сборочной единицы, изделия), данных о производственных условиях и ресурсах, объеме выпуска изделий и т.д., система должна обеспечить проектирование и выдачу в заданных форматах ТП, пригодного для реализации в заданных производственных условиях, при минимальном приложении интеллекта специалиста. Качество полученного проектного решения должно быть не ниже, чем при его формировании специалистом соответствующей квалификации [3, 4]. Информация, необходимая для автоматизированной системы, находится в операциях, которые осуществляются внутри производственного цикла. Производственный цикл изделия осуществляется на основе конструкции деталей и разработанной технологии их изготовления. Конструкция деталей состоит из поверхностей, к которым предъявляются технические требования, выполнение которых происходит в технологическом процессе. Между конструкцией и ТП существуют связи, от выбора которых зависят качество и трудоёмкость детали. При разработке размерных связей в машине определяют размеры поверхности деталей; относительное положение поверхностей деталей; относительное положение деталей в механизмах; относительное положение механизмов в машине. Кроме того, обеспечивают

размерными связями относительное положение исполнительных поверхностей машины, требуемое ее служебным назначением. Деталь машины характеризуется объемом материала, ограниченного рядом поверхностей, расположенных одна относительно другой в соответствии со служебным назначением детали в машине.

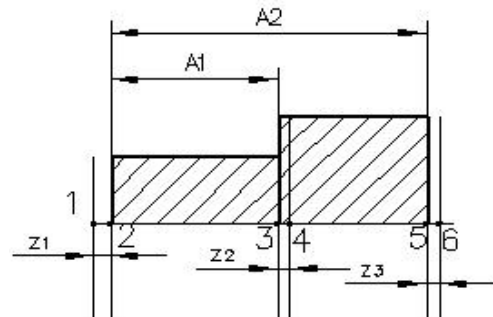
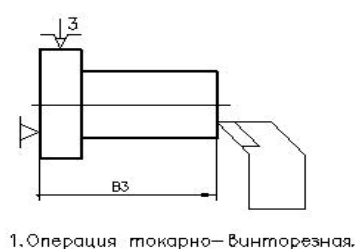
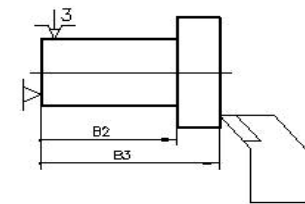


Рис. 1. Размерная схема

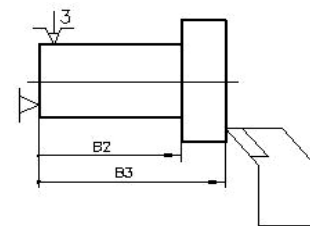


1. Операция токарно-винторезная.

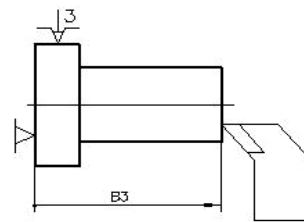


2. Операция токарно-винторезная.

Рис. 2. Вариант технологического исполнения



1. Операция токарно-винторезная.



2. Операция токарно-винторезная.

Рис. 3. Вариант технологического исполнения

Идеальным для выбора оптимального варианта ТП решением, которое ещё не широко распространено на производстве, является моделирование размерных изменений заготовки на стадии проектирования ТП. В качестве математического аппарата такого моделирования используется теория графов совместно с теорией размерных цепей (рис. 4). Деталь в процессе производства представлена в геометрической структуре, которая состоит из множества поверхностей размерных связей между ними.

Технологичность детали во многом определяется правильным выбором баз (конструкторских и технологических) и принятой системой простановки размеров [2].

Из двух представленных вариантов технологического исполнения на рис. 2, 3 1-й вариант правильный, т.к. конструкторская и технологическая база совпадают, и сохраняется принцип постоянства баз при выполнении операций. При разработке технологического процесса механообработки на сложные детали возникает огромное количество вариантов его исполнения. Технолог может выбрать тот вариант, который не будет отвечать требованиям, предъявленным к детали в чертеже.

При разработке ТП важную роль играют размерные связи. В настоящее время технолог принимает решения, основываясь на информации, которая представлена в чертеже. Таким образом, правильность принятия решения зависит от квалификации разработчика. Используя такую схему разработки ТП, затрачивается много времени, которое необходимо для проверки правильности принятого решения.

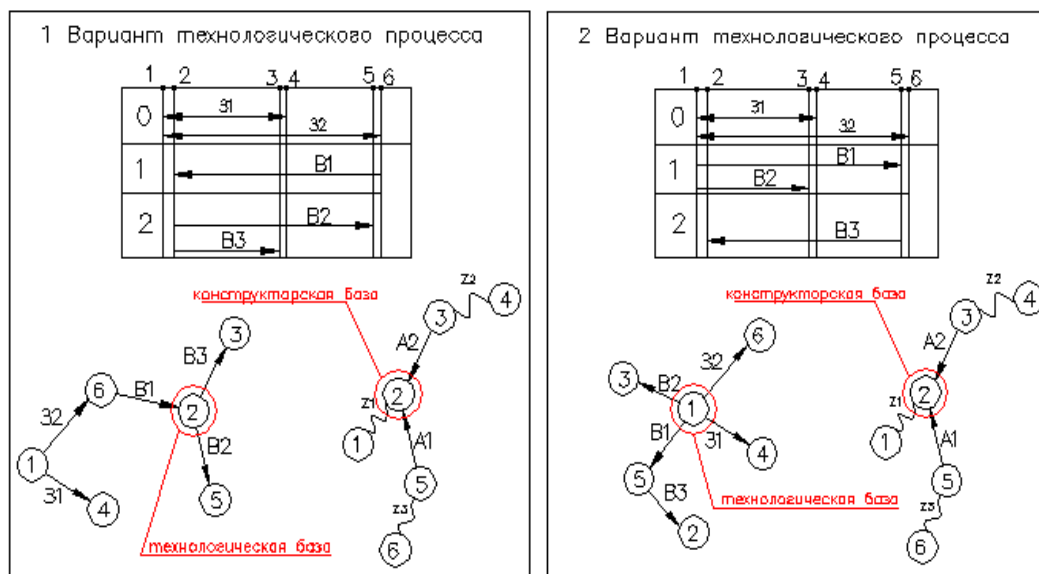


Рис. 4. Конструкторские и технологические графы

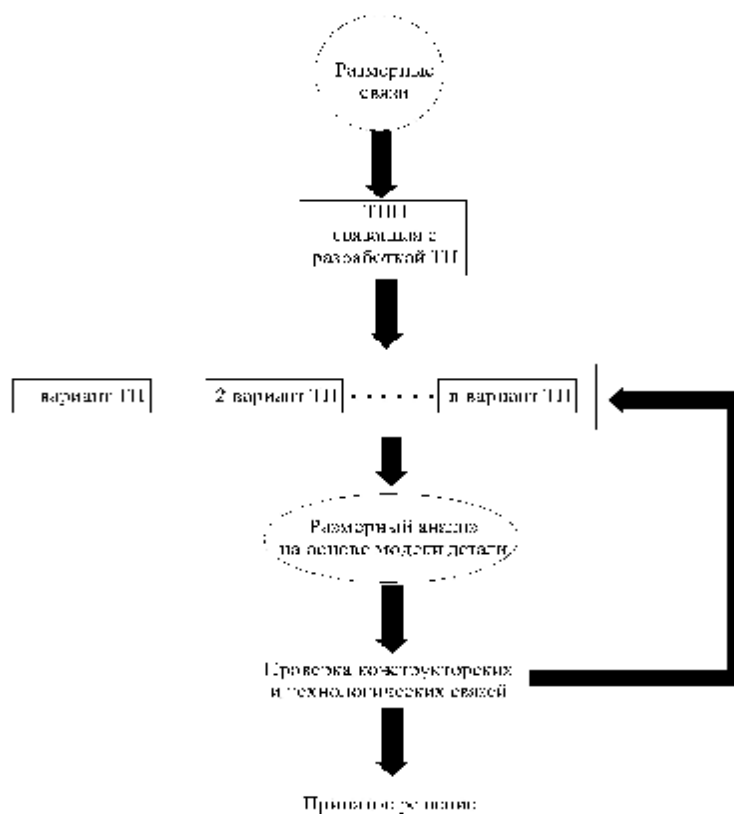


Рис. 5. Схема разработки ТПП на основе принятия проектных решений

В разработанной схеме, представленной на рис. 5, принятие проектных решений основывается на связях между конструктивными элементами и технологическим процессом. Используя математический метод графов, выстраиваются конструкторский (то, что требуется получить) и технологический (с помощью чего получаем требуемое) графы. Проведя анализ между графами, используя правила при разработке технологического процесса, осуществ-

вляется выбор рационального технологического процесса. Если требуемые условия не были достигнуты, процесс выбора и анализа повторяется.

Цель работы на стадии конструкторской разработки – предоставить технологу информацию об конструктивных связях в конструкции. Это действие сократит многовариантность исполнений ТП, тем самым повысит правильность выбора проектных решений и сократит время их принятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Норенков И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 320 с.
2. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения: учеб. для машиностроит. спец. вузов / И.М. Колесов. 3-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2001. 591 с.
3. Берлинер Э.М. САПР в машиностроении: учеб. для вузов / Э.М. Берлинер, О.В. Таратынов. М., 2008. 448 с.
4. Кондаков А.И. САПР технологических процессов: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / А.И. Кондаков. М.: Изд. центр «Академия», 2007. 272 с.

Белов Александр Павлович – аспирант кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Belov Aleksandr Pavlovich – The post-graduate student of chair «Designing of technical and technological complexes» of the Saratov State Technical University

Бочкарев Петр Юрьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Bochkarev Petr Yurievich – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of «Designing technical and technological complex» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 04.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.791.03-52

Л.Г. Бокова

СТРУКТУРА ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ В МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫХ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИХ СИСТЕМАХ

Предлагается подход к анализу производственной технологичности деталей применительно к условиям многономенклатурных механообрабатывающих систем. Представлена последовательность выполнения вычислительных процедур при оценке технологичности.

Производственная технологичность, оценка технологичности деталей, многономенклатурные производственные системы, механообрабатывающее производство

L.G. Bokova

STRUCTURE ASSESSMENT PRODUCTION DETAILS PROCESSABILITY IN THE DIVERSIFIED MECHANICAL SYSTEMS

The paper proposes an approach to the analysis of industrial technological details in relation to the conditions of diversified machining systems. Presented sequence of computing procedures in evaluating manufacturability.

Production manufacturability evaluation technological details, diversified production systems, production machining

Конкурентоспособность изделий машиностроения в первую очередь определяется обеспечением качества и снижением себестоимости их изготовления. Во многом это обеспечение зависит от координации работ на стадиях конструкторской и технологической подготовки. В качестве проектной процедуры такой координации выступает оценка спроектированных деталей на технологичность, и от полноты и достоверности результатов такой оценки во многом зависит результативность выполняемых работ.

Повышение эффективности функционирования производственных систем во многом определяется сроками и уровнем автоматизации технологической подготовки производства. Современные тенденции развития машиностроительного производства, в условиях частой сменяемости выпускаемой продукции, выдвигают на первый план задачу сокращения сроков разработки технологических процессов, и повышения качества проектных решений. Выполнение данных задач возможно только при создании автоматизированных систем технологической подготовки производства, способных приспособлять процесс изготовления изделий к непрерывно изменяющимся производственным условиям и объектам проектирования. Представляя производственную систему как систему по изготовлению деталей, а технологию – как одну из ее подсистем, обеспечивающую создание алгоритма функционирования производственной системы, можно сделать вывод, что необходимо создание технологии, которая не вносила бы дополнительные ограничения, а была в максимальной степени адаптирована к производству и позволяла максимально реализовать возможности производственной системы. Основываясь на этом, в [1, 2] сформулированы основные теоретические положения системы планирования технологических процессов механической обработки, которым должна отвечать методология создания технологических процессов в условиях многономенклатурных производственных систем.

Данный подход имеет принципиальные отличительные характеристики от известных систем технологической подготовки механообрабатывающих производств:

- полностью формализованы проектные процедуры технологической подготовки производства;
- проектирование технологических процессов ведется с учетом характера производства и возможностью оперативной корректировки технологических процессов в зависимости от изменения производственной ситуации;
- технология изготовления деталей строится с учетом технологических процессов в производственной системе в рассматриваемый интервал времени.

К настоящему времени созданы модели и разработаны подсистемы, позволяющие в полностью автоматизировать проектные процедуры создания технологических процессов изготовления деталей типа тел вращения на этапах формирования структуры и содержания технологических операций.

Однако выполнение технологической подготовки производства как этапа технической подготовки невозможно без установления взаимосвязей с предшествующим этапом в логической последовательности создания продукции – конструкторской подготовки. Основой таких

взаимосвязей является оценка технологичности изделий, которая обеспечивает наиболее полное использование конструкторско-технологических резервов для решения задач, связанных с повышением технико-экономических показателей изготовления и качества изделий с обеспечением заданных технических требований.

Технологичность конструкции необходимо рассматривать как комплексное решение задачи создания конструкции, обеспечивающей возможность использования всех особенностей технологических процессов во времени и пространстве, т.е. относя ее к определенным производственным заданиям и условиям. Под условиями, кроме существующего взгляда на технологичность конструкции машин и ее деталей, как функцию их объема выпуска и серийности предлагается учитывать такую важную составляющую функционирования производственной системы, как подсистему, обеспечивающую технологическую подготовку производства и организационное сопровождение реализации технологического процесса. В рамках производственной системы одновременно производится обработка деталей различных наименований, и эффективность работы системы во многом определяется технологической совместимостью деталей, которая определяется как однотипностью средств технологического оснащения, так и возможностью рациональной реализации процессов изготовления деталей, связанных с ситуационной перестройкой технологических процессов на различных этапах.

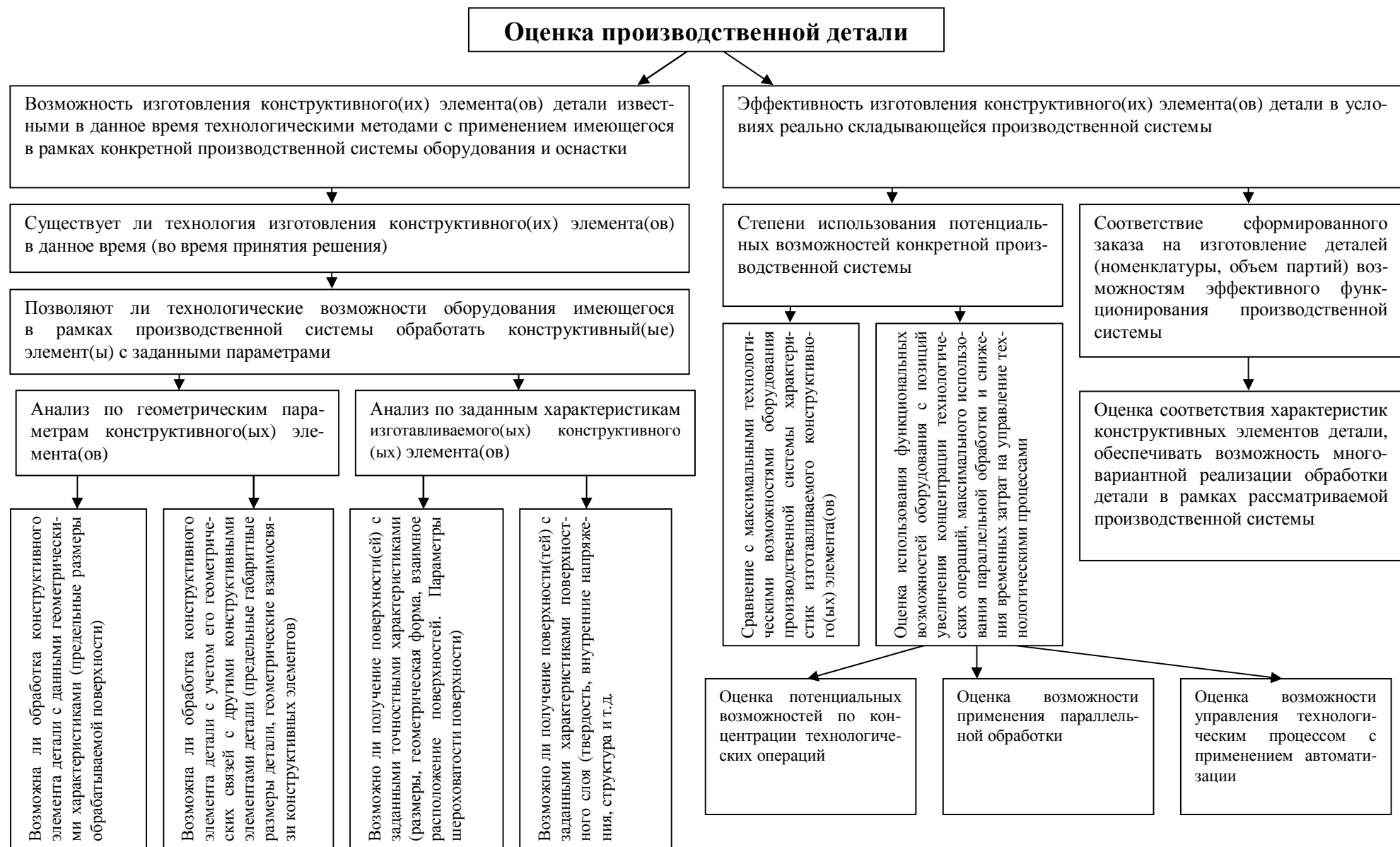
Создание или серьезное изменение подходов к организации технологического обеспечения производственных систем не может не отразиться на комплексе оценочных показателей технологичности изготавливаемых деталей. Технологичность детали зависит от реальных технологических возможностей оборудования в рамках рассматриваемой производственной системы, поэтому сформированная в рамках создания системы база данных, отражающая технологические возможности оборудования, позволяет провести анализ и дать количественную оценку соответствия между заданными техническими требованиями на изготовление и возможностями производственной системы. Кроме этого, появляется возможность проведения проверки конструктивных характеристик деталей на возможность их изготовления в рамках конкретной производственной системы с учетом технологических возможностей механообрабатывающего оборудования.

Определение уровня использования технического потенциала оборудования при изготовлении отдельных деталей и всей запланированной номенклатуры деталей должно быть совмещено с оценкой комплекта изготавливаемых деталей по показателю однородности по виду и конструктивным характеристикам поверхностей, как составляющих элементов деталей, и заключением о степени их унификации.

Оценка технологичности конструкции должна вестись на основе показателей, учитывающих возможность многовариантной реализации технологических процессов в реальных производственных условиях, т.е. показатели должны отражать вероятностный характер реального процесса изготовления деталей и предоставлять возможность определить предельные значения технологичности.

Методика оценки технологичности деталей должна строиться не для каждой отдельной детали, а для всей номенклатуры деталей, обработка которых происходит в рассматриваемый интервал времени в условиях конкретной производственной системы, с прогнозированием технико-экономических показателей изготовления, с целью выработки предложений по формированию рационального комплекта деталей для сформировавшихся реальных производственных условий.

Основываясь на вышепредставленных требованиях по совершенствованию оценки технологичности деталей в рамках создания системы планирования многономенклатурных технологических процессов, предлагается структурная схема вычислительных процедур, увязанных с функциональными возможностями конкретной производственной системы и технико-экономическими характеристиками ее функционирования. Последовательность вычислительных процедур и решаемые в рамках их задачи представлены на рисунке.



Последовательность вычислительных процедур при оценке технологичности деталей в системе планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки

При анализе технологичности важным фактором наряду с полнотой учета влияния конструктивных особенностей деталей на технологические аспекты их изготовления в условиях конкретной производственной системы является упорядочение и обоснование сопоставления критериев, используемых при ее количественной оценке. Производственная технологичность деталей обуславливает эффект при технологической подготовке производства, а также в процессе производства и контроля качества изделия. Таким образом, в качестве единого критерия технологичности конструкции целесообразнее всего использовать ее экономическую целесообразность при заданных номенклатуре, объемах изготовления и условиях производства.

В представленной последовательности оценки производственной технологичности деталей вычислительные процедуры разделены по функциональным задачам на две группы. В задачу первых входит отсев деталей, изготовление которых невозможно в условиях данной производственной системы с установлением конструктивно-технологических причин. В задачу вторых входит технико-экономическое заключение о соответствии комплекта обрабатываемых деталей возможностям конкретной производственной системы.

Проведенные исследования позволили предложить и обосновать комплект дополнительных к традиционно используемым критериев для оценки технологичности деталей на этапе их производства в общем жизненном цикле изделий, и установить взаимосвязи между этими критериями и эффективностью функционирования механообрабатывающих систем в конкретных производственных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарев П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарев // Технология машиностроения. 2002. № 1. С. 10-14.
2. Бочкарев П.Ю. Планирование технологических процессов в условиях многономенклатурных механообрабатывающих систем. Теоретические основы разработки подсистем планирования маршрутов технологических операций: учеб. пособие / П.Ю. Бочкарев, А.Н. Васин. Саратов: СГТУ, 2004. 136 с.
3. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
4. Кане М.М. Управление качеством продукции машиностроения: учеб. пособие / М.М. Кане. М.: Машиностроение, 2010. 416 с.

Бокова Лариса Геннадьевна – ассистент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Bokova Larisa Gennadievna – Junior Research Staff Member of the Department of «Design of Technical and Technological Complexes» of the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 04.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 537.534, 620.179.112 (075.8)

А.Н. Виноградов, Р.А. Константинов

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ОПЕРАЦИИ ШАРОДОВОДКИ НА СТАНКЕ С НОВОЙ КИНЕМАТИКОЙ

Статья посвящена выбору рациональных технологических режимов операции шародоводки на станке с новой кинематикой.

Оптимизация, выбор рациональных режимов, станок с новой кинематикой

A.N. Vinogradov, R.A. Konstantinov

**CHOICE OF RATIONAL TECHNOLOGICAL MODES
TO OPERATIONS AN BRING BALLS ON TOOL
WITH NEW CINEMATICS**

Article is devoted to the rational choice of technological modes of operation refinement of balls in the machine with the new cinematics.

Optimization, rational choice mode, the machine with the new cinematics

Предложена конструкция станка для доводки шаров, в которой имеется обрабатывающий диск, удерживающая чаша, на внутренней поверхности которой нанесен фрикционный слой. За счет исключения термдеформационных процессов отсутствует поверхностный дефектный слой, что достигается использованием материалов диска, не содержащих или малосодержащих углерод [1]. На данную конструкцию получен патент [2].

Для обеспечения стабильности и экономической целесообразности процессов операции шароодводки на станке с новой кинематикой необходимо задавать оптимальные технологические режимы обработки. Для решения этой задачи можно применить метод линейного программирования или симплекс – метод, позволяющий по заданным исходным параметрам процесса определить экстремальные параметры оценочной функции. Ранее [1, 2] были получены некоторые экспериментальные зависимости, которые характеризуют технические ограничения процесса тангенциального точения. В качестве критерия оптимальности была выбрана наименьшая себестоимость операции или машинное время, так как режимы шароодводки, обеспечивающие наименьшее машинное время, являются наиболее экономичными.

Примем в качестве оценочной функции уравнение машинного времени за единицу длины резания:

$$f = \frac{C}{nLF}; \tag{1}$$

где C – постоянный коэффициент, $C = jk$; F – нагрузка, прикладываемая к чаше, Н; φ – точностной коэффициент (для шаров нормальной точности 1); n – частота вращения чаши станка, мин^{-1} ; k – припуск на сторону, мм; L – длина рычага, мм.

На основании неравенств технических ограничений и уравнения (1) должен быть выбран рациональный режим обработки.

Выберем в качестве технических ограничений уравнения, полученные в результате экспериментальных исследований процесса, а также ограничения технологических факторов, взятые из литературных данных [3]. Выражение технического ограничения имеет вид

$$nL^{y_v} \leq \frac{318C_v K_v d^{z_v-1} N}{F^{x_v} L^{u_v} n^{r_v}};$$

где C_v – постоянный коэффициент, характеризующий нормативные условия шароодводки ($C_v=47$); d – диаметр шара ($d=7,8$ мм); K_v – точностной коэффициент ($K_v=1$); N – число шаров в партии ($N = 166$ шт.); m – показатель относительной стойкости ($m=0,2$); F – нагрузка, прикладываемая к чаше; L – длина рычага; n – частота вращения чаши; x_v, y_v, z_v, u_v, r_v – показатели степеней ($x_v = 0,1; y_v = 0,8; z_v = 0; u_v = 0; r_v = 0$).

В качестве факторов оптимизации выбираем частоту вращения чаши n , рычаг, прикладываемый к чаше L и нагрузку на чашу F .

Запишем систему ограничений с учетом выбранных факторов и оценочной функции:

$$\left\{ \begin{array}{l} n^{-3,01} \geq \frac{\Delta_{\max}}{1,441 \cdot 10^{-6}}; \\ L^{-0,401} \cdot F^{-1,884} \geq \frac{Ra_{\max}}{1,765 \cdot 10^4}; \\ L^{-0,988} \cdot F^{-2,32} \geq \frac{\Delta_{K \max}}{7,379 \cdot 10^4}; \\ nL^{0,8} F^{0,1} \leq 318 \cdot 47 \cdot 1 \cdot 7,8^{-1} 166; \\ n \leq 34; \\ n \geq 96; \\ L \leq 12; \\ L \geq 24; \\ F \leq 1400; \\ F \geq 4800; \end{array} \right. \quad (2)$$

$$f = \left(\frac{C}{nLF} \right)_{\max}$$

Прологарифмируем правые и левые части неравенств (2) и обозначим правые части через $B_1, B_2 \dots B_{10}$, обозначив логарифмы факторов процесса $\ln n - x_1, \ln L - x_2, \ln F - x_3$ и преобразуя систему неравенств и оценочную функцию, приведем ее к каноническому виду и введем искусственный базис для того, чтобы полученная система ограничений имела полный единичный базис, которому соответствует опорное решение системы.

$$\left\{ \begin{array}{l} -3,01x_1 - x_4 = B_1; \\ -0,401x_2 - 1,884x_3 - x_5 = B_2; \\ -0,988x_2 - 2,32x_3 - x_6 = B_3; \\ x_1 + 0,8x_2 + 0,1x_3 + x_7 = B_4; \\ x_1 + x_8 = B_5; \\ x_1 - x_9 = B_6; \\ x_2 + x_{10} = B_7; \\ x_2 - x_{11} = B_8; \\ x_3 + x_{12} = B_9; \\ x_3 - x_{13} = B_{10} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$f_o = (\hat{x}_1 + \hat{x}_2 + \hat{x}_3)$$

Решение системы (3) представляет собой область, содержащую оптимальные значения $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$. Решение данной системы произведено симплекс-методом с помощью программы MathCAD 2000. Решение подобных задач описывается в [3]. Для данного решения оптимальными будут значения факторов со следующими координатами:

$$\hat{x}_1 = 6,8669; \quad \hat{x}_2 = -3,5065; \quad \hat{x}_3 = -2,9957.$$

Тогда оптимальные значения технологических режимов будут равны:

$$n = e^{\hat{x}_{10nm}} = 84 \text{ мин}^{-1};$$

$$L = e^{\hat{x}_{20nm}} = 14 \text{ мм};$$

$$F = e^{\hat{x}_{30nm}} = 4800 \text{ мм}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение качества шаров подшипников 180302 / В.Г. Куранов, А.Н. Виноградов, Р.А. Константинов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 3 (41). С. 127-130.

2. Станок для доводки шаров / Куранов В.Г., Виноградов А.Н., Константинов Р.А. Заявка на конструкцию РФ, № 2009115111 от 20.04.2009. Положительное решение о выдаче патента на изобретение.

3. Горанский Г.К. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ / Г.К. Горанский, Е.В. Владимиров, Л.Н. Ламбин. М.: Машиностроение, 1970. 224 с.

Виноградов Александр Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета

Vinogradov Aleksandr Nikolaevich – Doctor of Technical sciences, Professor of the Department of «Automobiles and automobile sector» of Saratov State Technical University

Константинов Роман Александрович – аспирант кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета

Konstantinov Roman Aleksandrovich – post-graduate student of «Automobiles and automobile sector» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 20.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 629.113.004.67

А.С. Денисов, Р.И. Альмеев

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДПУСКОВОЙ СМАЗКИ

Статья посвящена проблеме обеспечения надёжности двигателей при низких температурах. Проведён анализ причин возникновения повышенных пусковых износов двигателей. Разработано устройство предпусковой смазки, способствующее оптимизации параметров смазочного процесса на режимах пуска и прогрева. По результатам стендовых испытаний сделаны выводы об эффективности предложенного устройства.

Надёжность; пусковые износы; устройство предпусковой смазки; испытания; эффективность

A.S. Denisov, R.I. Almeev

THE OPERATING LIFE IMPROVEMENT OF CRANKSHAFT BEARINGS BY PRE-LUBRICATION SYSTEM USAGE

The article is devoted to the problem of engines reliability maintenance in low temperature conditions. The analysis of reasons of the engines starting wears is given. The device for pre-starting lubrication promoting optimization of lubricant process parameters on start-up and warming modes is developed. Conclusions of the offered device efficiency by results of bench tests are makes.

Reliability; starting wears; the device for pre-starting lubrication; tests; efficiency

Условия работы автомобильных двигателей в период пуска-прогрева значительно отличаются от условий работы на номинальных нагрузочных и скоростных режимах и оказывают существенное влияние на долговечность и безотказность основных деталей. Анализ причин отказов коленчатых валов двигателей КАМАЗ-740 по результатам статистической обработки показывает, что значительное их количество (22 %) приходится на проворачивание шатунных и коренных вкладышей, задир коренных или шатунных шеек, а также их аварийный износ [2].

Основной эксплуатационной причиной повышенного изнашивания и возникновения отказов подшипников коленчатых валов автомобильных двигателей следует считать нарушение условий смазки. При недостаточном давлении масла на входе в подшипник могут нарушаться условия гидродинамического трения, в результате толщина масляного слоя может стать ниже критической, что повысит вероятность проворачивания вкладышей.

Данная проблема наиболее актуальна при эксплуатации двигателя в условиях низких температур, когда происходит значительное увеличение вязкости масла, снижение эффективности работы масляного насоса и фильтрующих элементов. В таких условиях время поступления смазочного материала к узлам трения при пуске возрастает в несколько раз.

Основное влияние на изнашивание деталей оказывает изменение характеристик эксплуатационных материалов. Низкая температура охлаждающей жидкости в наибольшей степени способствует коррозионно-механическому изнашиванию, а низкая температура масла (малая прокачиваемость и задержка его поступления к деталям) – интенсификации молекулярно-механического и абразивного изнашивания.

Рассмотренные исследования [1, 4] показывают, что для каждого сопряжения двигателя существует своя оптимальная температура масла в картере, при которой наблюдается минимальный износ. Отклонение параметров теплового режима работы двигателя от оптимальных значений при пуске и прогреве приводит к значительному увеличению износа его сопряжений. Анализ экспериментальных данных [3, 6] показывает, что пробег, эквивалентный одному холодному пуску по износу, а следовательно потеря ресурса, в интервале температур от -30°C до $+30^{\circ}\text{C}$ возрастает в шесть раз. Снижение пусковых износов возможно за счёт поддержания оптимального теплового режима двигателя и нормальной работы его систем во время пуска и прогрева.

С целью повышения долговечности двигателя предложено устройство предпусковой смазки, способствующее оптимизации параметров смазочного процесса на режимах пуска и прогрева (патент РФ на полезную модель № 88 737 [5]). Основной целью модернизации системы смазки путем установки данного устройства является сокращение времени поступления моторного масла к деталям двигателя в процессе холодных пусков. Таким образом, обеспечивается сокращение времени работы подшипников коленчатого вала и турбокомпрессоров на неблагоприятных режимах.

Изготовлен опытный образец устройства и проведены экспериментальные исследования. Цель исследований – анализ параметров смазочного процесса и оценка эффективности работы устройства предпусковой смазки при установке его на двигатели с различной конструкцией систем смазки.

При проведении испытаний использовали двигатель КАМАЗ-740.62-280, установленный на стенде фирмы «AVL». Испытания с имитацией пониженного теплового режима работы проводили на двигателях КАМАЗ-740.10 и ЗМЗ-4062.10. В процессе испытаний проведен сравнительный анализ рабочих и оценочных параметров на двигателе со штатной системой смазки и двигателе с установленной системой предпусковой смазки.

Основным параметром, характеризующим эффективность предпусковой подготовки системы смазки, является давление в масляной магистрали. Из рис. 1 видно, что с понижением температуры масла, увеличивается давление масла в магистрали.

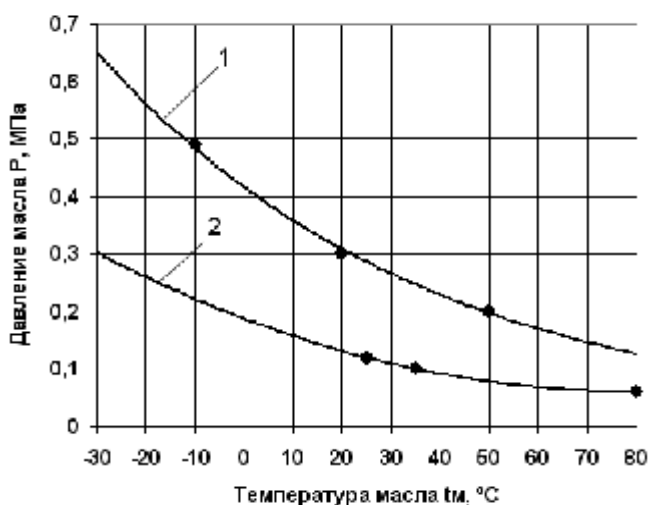


Рис. 1. Зависимости давления в главной масляной магистрали двигателя КАМАЗ-740.62-280 к концу предпусковой прокачки (2) и давления на выходе масло-закачивающего насоса (1) от температуры масла

Экстраполяция данного графика показывает, что при температуре масла -20°C давление к концу прокачки составит около 0,25 МПа (то есть половину штатного номинального давления [2,3]). Также на данном графике приведена кривая, описывающая давление на выходе масляного насоса. Повышенное давление при более низких температурах связано с увеличением общего гидравлического сопротивления системы смазки. При этом соответственно увеличиваются потери давления при прохождении каналов и фильтров. В результате разность давлений на выходе маслозакачивающего и в магистрали двигателя повышается.

Предпусковая прокачка существенно сокращает время достижения номинального давления после запуска двигателя (рис. 2). Это способствует сокращению времени поступления масла к узлам трения.

По результатам испытаний были сделаны выводы об эффективности работы устройства предпусковой смазки:

1) Обеспечивает поступление достаточного объема смазочного материала к подшипникам коленчатого вала перед пуском двигателя, позволяет уменьшить время поступления масла к деталям во время холодного пуска и предотвратить повышенный их пусковой износ.

2) Обеспечивает поддержание давления в системе смазки перед пуском двигателя в пределах 0,06...0,3 МПа в зависимости от начальной температуры масла.

3) Устройство наряду с использованием штатного пускового подогревателя обеспечивает не только надёжный запуск, но и долговечную работу двигателя. По результатам исследования получено, что использование устройства предпусковой смазки на двигателе позволяет снизить интенсивность изнашивания подшипников коленчатого вала на 5-10% в зависимости от начальной температуры пуска, что позволяет сделать вывод о соответственном увеличении межремонтного ресурса.

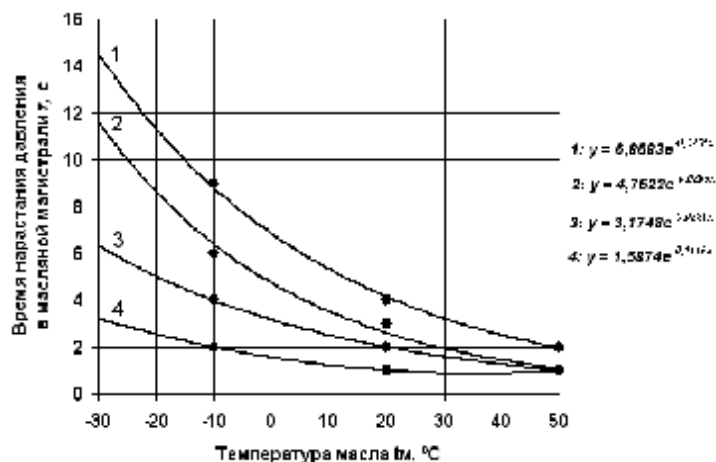


Рис. 2. Зависимости времени нарастания давления в главной масляной магистрали после запуска дизеля от температуры масла: 1 – без предпусковой прокачки; 2 – с предпусковой прокачкой в течение 10 с; 3 – 20 с; 4 – 30 с

Применение разработанного устройства целесообразно на высокофорсированных дизельных двигателях, работающих в районах с низкими температурами воздуха. В связи с этим предложенное устройство можно рекомендовать автопроизводителям грузовой техники для испытания и последующей установки на автомобили, поставляемые для эксплуатации в районы Крайнего Севера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдонькин Ф.Н. Оптимизация изменения технического состояния автомобиля / Ф.Н. Авдонькин. М.: Транспорт, 1993. 350 с.
2. Денисов А.С. Обеспечение надежности автотракторных двигателей / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков. Саратов: СГТУ, 2007. 422 с.
3. Денисов А.С. Восстановление деталей силового агрегата КАМАЗ 740.11-240 [Euro-1]: учеб. пособие / Р.А. Азаматов [и др.]; ред. А.С. Денисов. Набережные Челны: Полиграф. фирма ГКИ, 2007. 307 с.
4. Денисов А.С. Основы формирования эксплуатационно-ремонтного цикла автомобилей / А.С. Денисов. Саратов: СГТУ, 1999. 352 с.
5. Денисов А.С. Устройство для предпусковой смазки двигателя внутреннего сгорания: пат. на полезную модель № 88737 / А.С. Денисов, Р.И. Альмеев // Бюл. госуд. реестра полезных моделей РФ, 2009, № 32.
6. Лосавио Г.С. Эксплуатация автомобилей при низких температурах / Г.С. Лосавио. М.: Транспорт, 1973. 117 с.

Денисов Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета

Denisov Aleksandr Sergeevich – Doctor of Technical sciences, Professor, chair of «Automobiles and automobile sector» of Saratov State Technical University

Альмеев Руслан Игоревич – аспирант кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета

Almeev Ruslan Igorevich – post-graduate student of «Automobiles and automobile sector» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 11.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.357.7.014

А.С. Денисов, А.Р. Асоян, А.А. Суханкин

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОРЕННЫХ ОПОР БЛОКА ЦИЛИНДРОВ ДВИГАТЕЛЯ КАМАЗ

Рассмотрены дефекты постелей блока возникающие в процессе эксплуатации, вследствие чего понижается надежность силового агрегата. Проведен анализ напряженно-деформируемого состояния опор блока с использованием программного обеспечения АРМ WinMachine 9.6.

Повышение надежности, опора блока, анализ напряженно-деформируемого состояния, моделирование

A.S. Denisov, A.R. Asoyan, A.A. Suhankin

ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF NATIVE SUPPORTS THE CYLINDER ENGINE KAMAZ

The defect unit beds occur during the operation resulting in reduced reliability of the power unit. Analysis of the stress-deformed state supports a block using the software АРМ WinMachine 9.6.

Improve reliability, support block, an analysis of the stress-deformed state, the simulation

Значительная часть двигателей (до 30%) поступает в ремонт (чаще капитальный) из-за проворачивания вкладышей. Часто считается, что это внезапный отказ, однако проворачивание вкладышей является результатом закономерного процесса деформации вкладышей по образующей в виде прогиба. Прогиб вкладышей является следствием их напряженного состояния, при котором напряжения могут превышать предел текучести [1]. Из-за этого уменьшается фактический зазор в подшипниках и наблюдается снижение сцепления вкладыша с постелью. Изменение размеров и формы отверстий коренных опор от нормативных, снижает площадь соприкосновения наружной стенки вкладыша с постелью блока, что приводит к существенному снижению коэффициента теплоотдачи, нагреванию подшипников, схватыванию их с шейкой коленчатого вала и проворачиванию (рис. 1).



Рис. 1. Износ постели блока в результате перегрева сопряжения и проворачивания коренного подшипника

В процессе работы двигателя блок цилиндров испытывает значительные нагрузки от сил давления газов в цилиндрах, от сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс, значительные тепловые нагрузки из-за неравномерного нагрева его отдельных частей, т.е. неравномерного распределения тепловых полей. Кроме того, опоры блока цилиндров воспринимают монтажные усилия от затяжки силовых шпилек и болтов.

Для определения сил и моментов, действующих на коренные опоры блока цилиндров, при различных положениях кривошипно-шатунного механизма КШМ, проводим динамический расчет двигателя, результаты которого используем для последующего расчета на прочность, сил трения, износа деталей и т.д. Этапы динамического расчета включают построение векторных диаграмм сил, действующих на шатунные и коренные шейки коленчатого вала.

Векторная диаграмма усилий, действующих на коренную опору двигателя КамАЗ-740, представлена на рис. 2.

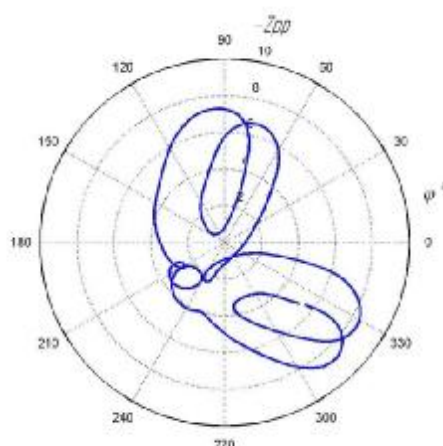


Рис. 2. Векторная диаграмма сил, действующих на коренную шейку

Максимальное значение силы давления газов, направленное вдоль оси цилиндра, достигает $p_z = 8,4 \text{ МПа}$.

Для анализа напряженно-деформированного состояния коренных опор блоков цилиндров используем твердотельное моделирование с автоматическим построением конечно-элементной сетки [2]. На рис. 3 представлена конечно – элементная модель опоры блока цилиндров двигателя КамАЗ-740, содержащая 20 тыс. тетраэдральных конечных элементов при 5 тыс. узлах. При расчете использовалось программное обеспечение – APM WinMachine 9.6, позволяющее определять усилия, действующие на каждый конечный элемент. Анализ напряженно-деформированного состояния опор блока цилиндров подтверждает результаты исследования рассеивания размеров и форм коренных опор блоков, вследствие действия нагрузок, в процессе эксплуатации.

На рис. 3 видно, что поля напряжений отличаются значительной неравномерностью распределения, наибольшие напряжения находятся в нижней части бугеля по направлениям, действия равнодействующих газовых сил и составляют 55-60 МПа, в верхней части опоры напряжения от действия инерционных сил составляют 37-45 МПа.

Вследствие длительного действия вышеописанных нагрузок и повышения температуры в сопряжении опора-вкладыш-шейка коленчатого вала, при нестационарных режимах работы (температура достигает выше 300°C), (рис. 1), в зонах действия максимальных напряжений проявляются такие свойства материалов как ползучесть, связанная с возрастанием пластических деформаций при постоянных нагрузках. Вследствие этого происходит понижение модуля упругости, предела текучести S_T и прочности S_σ материала. Если перемеще-

ния точек тела остаются неизменными, то имеет место релаксация, проявляющаяся в виде микро- и макротрещин, образующихся в зоне масляного канала. Скорость ползучести материала зависит от напряжения s и температуры T и может быть выражена

$$x_{\min}^c = Q(s) \cdot q(T), \quad (1)$$

где $Q(s)$ – функция напряжения, $q(T)$ – функция температуры.

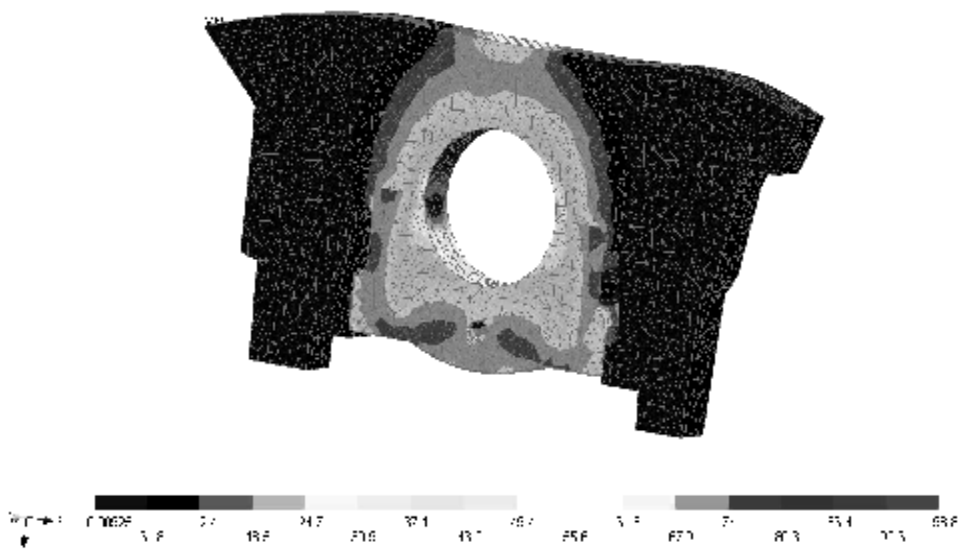


Рис. 3. Распределение напряжений S_z (МПа) в коренной опоре блока цилиндров КамАЗ-740

$$Q(s) = k \cdot s^n, \quad (2)$$

где k, n – коэффициенты, зависящие от температуры и определяемые экспериментально.

Результаты работы позволяют смоделировать процессы изменения размеров и формы коренных опор блока цилиндров, возникающие в процессе эксплуатации, что позволяет прогнозировать межремонтный срок службы агрегата и выбрать необходимый метод восстановления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов А.С. Обеспечение надежности автотракторных двигателей / А.С. Денисов, А.Г. Кулаков. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2007. 422 с
2. Конструирование двигателей внутреннего сгорания / Н.Д. Чайнов, Н.А. Иващенко, А.Н. Краснокутский, Л.Л. Мягков. М.: Машиностроение, 2008. 496 с.

Денисов Александр Сергеевич –
Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Автомобили
и автомобильное хозяйство»
Саратовского государственного
технического университета

Denisov Alexander Sergeevich –
Doctor of Technical sciences, Professor,
chair of «Automobiles and automobile sector»
of Saratov State Technical University

Асоян Артур Рафикович –
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Автомобили и автомобильное
хозяйство» Саратовского государственного
технического университета

Asoyan Artur Rafikovich –
Candidate of Technical Sciences, the senior
lecturer of chair «Automobiles and automobile
sector» of Saratov State Technical University

Суханкин Андрей Александрович –
аспирант кафедры «Автомобили
и автомобильное хозяйство»
Саратовского государственного
технического университета

Syhankin Andrey Aleksandrovicy –
post-graduate student of «Automobiles
and automobile sector»
of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 11.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 629.113.004.67

А.С. Денисов, И.Г. Иванов

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ САЛЬНИКА ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

В режиме постоянной деформации, в котором работает большинство уплотнений, протекает непрерывный процесс снижения напряжения до его равновесного значения – релаксация напряжения. Скорость накопления остаточной деформации характеризуется значением относительной остаточной деформации. Время химической релаксации напряжения резин формально подчиняется закону Аррениуса. Чем выше температура, тем меньше время протекания процесса. В процессе эксплуатации уплотнения наблюдается износ вала и губки уплотнения, который описывается дифференциальным уравнением скорости изнашивания.

Техническое состояние, эксплуатационные факторы, скорость изнашивания

A.S. Denisov, I.G. Ivanov

CHANGE IN STATUS UNDER THE INFLUENCE OF PACKING OF OPERATING FACTORS

In the constant strain, which runs most of the seals, runs a continuous process to reduce the voltage to its equilibrium value – the relaxation of tension. The rate of accumulation of residual strain is characterized by the value of relative residual deformation. The chemical stress relaxation of rubbers formally obeys the Arrhenius law. The higher the temperature, the less time the process. In the operation of the shaft seal wear occurs and the sponge seal, which is described by the differential equation the rate of wear.

Status under, operating factors, rate of wear

Ресурс сальников зависит от нагрузочного, скоростного и теплового режимов работы. В зависимости от характера использования агрегата ресурс сальника может измеряться в тыс. км пробега автомобиля или в тыс. ч работы агрегата. В первом случае ресурс определяется в основном процессами изнашивания сопряжения, а во втором – в основном процессами изменения упругих свойств сальника во времени (старение).

Процессы установления равновесия, временной ход которых определяется перегруппировкой частиц под воздействием теплового движения, являются релаксационными.

В режиме постоянной деформации, в котором работает большинство уплотнений, протекает непрерывный процесс снижения напряжения до его равновесного значения – релаксация напряжения, для описания которого используют экспоненциальное уравнение Хивеленда [1, 3]:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-a\tau}, \quad (1)$$

где σ_0 – исходное напряжение; a – константа скорости процесса релаксации.

Скорость накопления остаточной деформации характеризуется значением H , относительной остаточной деформацией:

$$H = \frac{\varepsilon_{ост}}{\varepsilon} = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_t}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{ост} = (h_0 - h_2)/h_t$ – остаточная деформация; h_2 – высота образца после снятия нагрузки; h_0 – исходная высота образца; h_t – текущее значение высоты образца.

В качестве первого допущения при обосновании формы зависимости H от τ принимаем линейный характер зависимости скорости остаточной деформации $dH/d\tau$ от напряжения

$$\frac{dH}{d\tau} = b\sigma, \quad (3)$$

где b – коэффициент пропорциональности.

С учётом уравнения (1) [1, 3] запишем

$$\frac{dH}{d\tau} = b\sigma_0 e^{-a\tau} \quad (4)$$

$$dH = b\sigma_0 e^{-a\tau} d\tau \quad (5)$$

$$H = \int b\sigma_0 e^{-a\tau} d\tau = -b\sigma_0 a e^{-a\tau} + C_u \quad (6)$$

Постоянную интегрирования C_u определим из начальных условий: при $\tau = 0 \rightarrow H = 0$, откуда $C_u = b\sigma_0 a$, тогда

$$H = b\sigma_0 a - b\sigma_0 a e^{-a\tau} = b\sigma_0 a (1 - e^{-a\tau}). \quad (7)$$

По физическому смыслу $b\sigma_0 a = H_0$ – относительная остаточная деформация в начале эксплуатации (в конце приработки).

Скорость нарастания остаточной деформации в процессе эксплуатации зависит от температуры. При действии высоких температур на напряженные резиновые уплотнители резко ускоряются процессы химической релаксации напряжения, накопления остаточной деформации и снижения остаточной эластичности.

Время τ химической релаксации напряжения резин формально подчиняется закону Аррениуса [1, 3]

$$\tau = B e^{U/RT}, \quad (8)$$

где B – константа скорости процесса; U – энергия активации; R – постоянная Больцмана; T – температура.

Чем выше температура, тем меньше время протекания процесса. Это означает, что при этом повышается скорость нарастания остаточных деформаций и снижается ресурс уплотнения.

В процессе эксплуатации уплотнения наблюдается износ вала и губки уплотнения. Для описания этого процесса составим дифференциальное уравнение скорости изнашивания. В качестве второго допущения примем то, что с ростом износа деталей сопряжения S линейно снижается и давление в зоне трения, и скорость изнашивания v

$$v = v_0 - bS, \quad (9)$$

где v_0 – скорость изнашивания в конце приработки, приведённая к началу эксплуатации; b – изменение скорости изнашивания на единицу износа.

Поскольку $v = dS/d\tau$, решение дифференциального уравнения (9) при начальных условиях: $S=0$ при $\tau=0$ даёт уравнение в виде

$$S = S_0(1 - e^{-b\tau}) \quad (10)$$

где S_0 – износ в начале эксплуатации (в конце приработки).

Износ сопряжения и остаточная деформация уплотнения приводят к повышению расхода жидкости через уплотнение, что и ограничивает его ресурс. Сравнивая зависимости (7) и (10), видим, что они имеют одинаковый характер. Следовательно, и расход жидкости через уплотнение в процессе эксплуатации (хранения) возрастает по экспоненциальной затухающей зависимости

$$Q = Q_0(1 - e^{-b\tau}) \quad (11)$$

где Q_0 – расход жидкости в начале эксплуатации (в конце приработки).

Для проверки зависимости (10) были собраны статистические данные, после обработки которых была построен график зависимости износа поверхности вала под манжетное уплотнение от наработки. Из графика видно, что интенсивность изнашивания уплотнения снижается.

При сложившихся условиях эксплуатации автомобиля в качестве измерителя наработки τ можно использовать пробег l . Для большинства машин и механизмов допустимая норма утечек рабочей жидкости составляет $0,5 \text{ см}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ [2]. Используя это значение и обоснованную зависимость (11), можно прогнозировать остаточный ресурс уплотнения.

Если принять ресурс уплотнения при неработающем агрегате (режим хранения) за 100%, то при работе агрегата ресурс сокращается вследствие повышения температуры и изнашивания. В конкретных климатических условиях среднюю температуру работы уплотнения можно определить с учётом интенсивности эксплуатации автомобиля. Если при среднем статистическом режиме работы двигателя температура уплотнения составляет в среднем t_p , то для средней температуры уплотнения t_y можно записать

$$t_y = t_c(1-d) + t_p d, \quad (12)$$

где t_c – средняя температура окружающей среды; d – доля времени работы двигателя.

Долю времени работы двигателя можно определить по среднесуточному пробегу автомобиля и средней скорости движения. Так, при среднесуточном пробеге автомобиля 200 км и средней скорости 40 км/ч время работы в сутки составит 5 ч, а доля времени работы двигателя $5/24 = 0,208$. При неработающем двигателе (режим хранения) доля времени равна нулю и температура уплотнения равна температуре окружающей среды.

В таблице приведены значения доли времени работы двигателя и средней температуры уплотнения в зависимости от среднесуточного пробега. Для определения соотношения ресурса уплотнений при различных режимах использования автомобиля использовали данные исследования [1] по кинетике накопления остаточной деформации резиной при различных температурах.

По кинетике накопления остаточной деформации резиной была построена зависимость среднего темпа старения (накопления остаточной деформации) от температуры (рис. 2). По аппроксимирующему полиному второй степени было определено значение темпа старения при температуре 20°C . Поскольку ресурс уплотнения обратно пропорционален темпу старе-

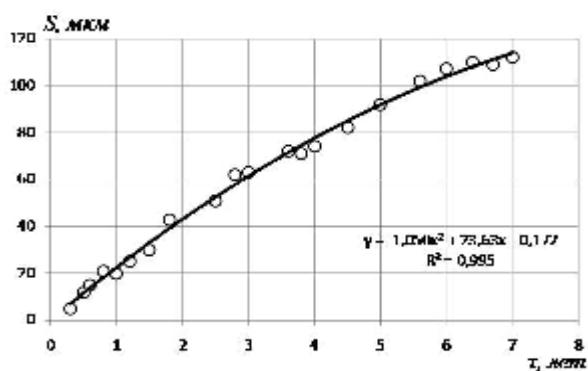


Рис. 1. Зависимость износа поверхности вала под манжетное уплотнение от наработки

ния, зависимость ресурса от температуры будет убывающей. Это отражено в таблице, где приведены значения относительного ресурса уплотнения. При этом за 100% принят ресурс неработающего уплотнения.

Значения параметров уплотнения в зависимости от интенсивности эксплуатации автомобиля

l_{cc}	0	50	100	150	200	250	300	400	500	1000
d	0	0,052	0,104	0,156	0,208	0,26	0,313	0,416	0,521	0,83
t_y	20	27,3	30,4	35,6	40,8	46	51,3	61,7	72,1	103,4
H'	0,35	0,4	0,53	0,7	0,8	1,0	1,2	1,5	1,75	3,5
τ	100	87,5	66	50	43,8	35	29	23	20	10

Примечание: l_{cc} – среднесуточный пробег автомобиля, км; d – доля времени работы двигателя в сутки, %; t_y – средняя температура уплотнения, °С; H' – средний темп прироста остаточной деформации, % в сутки; τ – относительный ресурс уплотнения, %.

Для промежуточных значений среднесуточного пробега автомобилей при корректировании ресурса уплотнений можно использовать график, приведённый на рис. 3.

Таким образом, в процессе эксплуатации происходит закономерное изменение технического состояния сальниковых уплотнений вследствие процессов старения и изнашивания. Обоснованы типы зависимостей остаточной деформации, износа сальника от наработки, а также зависимости его ресурса от интенсивности эксплуатации автомобиля.

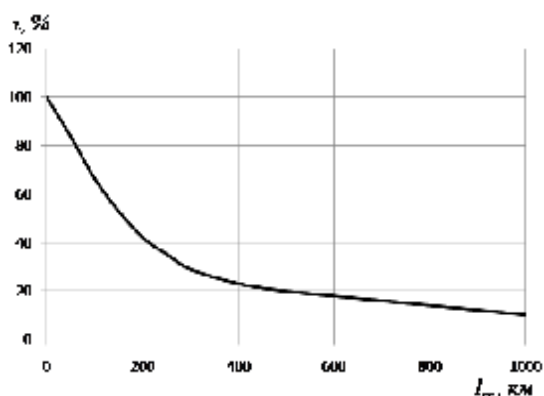


Рис. 2. Зависимость среднего темпа прироста остаточной деформации резины от температуры уплотнения

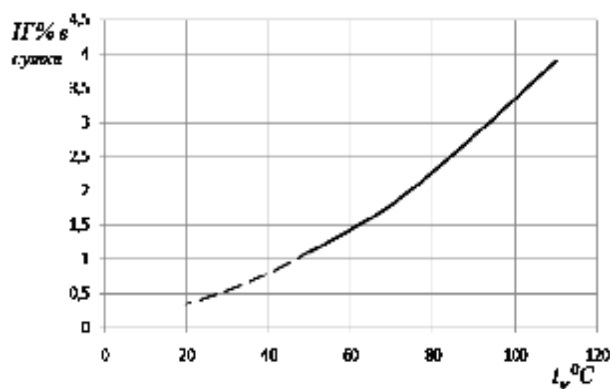


Рис. 3. Зависимость относительного ресурса уплотнения от среднесуточного пробега

ЛИТЕРАТУРА

1. Аврущенко Б.Х. Резиновые уплотнители / Б.Х. Аврущенко. Л.: Химия, 1978. 136 с.
2. Бергштейн Л.А. Лабораторный практикум по технологии резины / Л.А. Бергштейн. Л.: Химия, 1989. 248 с.
3. Браун Д. Практическое руководство по синтезу и исследованию свойств полимеров / Д. Браун, Г. Шердрон, В. Керн. М.: Химия, 1976. 256 с.

Денисов Александр Сергеевич –
 Доктор технических наук, профессор,
 заведующий кафедрой «Автомобили
 и автомобильное хозяйство»
 Саратовского государственного
 технического университета

Denisov Alexander Sergeevich –
 Doctor of Technical sciences, Professor,
 chair of «Automobiles and automobile sector»
 of Saratov State Technical University

Иванов Иван Геннадьевич –
аспирант кафедры «Автомобили
и автомобильное хозяйство»
Саратовского государственного
технического университета

Ivanov Ivan Gennadjevich –
post-graduate student of «Automobiles
and automobile sector»
of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 11.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 658.52.011.56.012

В.А. Добряков

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАНКОВ КАК ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ

Рассматривается формирование теоретических основ оценки технического состояния металлорежущих станков на этапах контроля, диагностирования и испытаний.

Металлорежущий станок, техническое состояние, система контроля, диагностирования и испытаний, программно-математическое обеспечение, диагностические параметры

V.A.Dobryakov

FORMALIZATION OF THE ESTIMATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF MACHINE TOOLS AS OBJECTS OF THE CONTROL, DIAGNOSING AND TESTS

Formation of theoretical bases of an estimation of a technical condition of metal-cutting machine tools at stages of the control, diagnosing and tests is considered.

Dynamic system, object of diagnosing, the monitoring system, diagnosing and tests, a programmno-software, a technical condition, diagnostic parametres

Современные прецизионные металлорежущие станки (МРС) принадлежат к категории динамических систем (ДС). ДС – некоторая структура, представляющая собой совокупность взаимосвязанных элементов различной природы, предназначенная для выполнения определенных операций и осуществляющая направленный процесс преобразования во времени материи (вещества, энергии) и информации [1, 2].

Известно, что эффективность функционирования МРС зависит от их технического состояния. В процессе эксплуатации, если не применять специальных мер, техническое состояние МРС ухудшается. В связи с этим возникает проблема управления техническим состоянием станков, включающая следующие аспекты: рациональная организация контроля технического состояния, эффективные методы диагностирования и прогнозирования, определение моментов проведения технического обслуживания и профилактического ремонта (восстановления), надежные методы испытаний станков [3].

Практическое решение проблемы достигается путем разработки автоматизированной системы контроля и диагностирования (СКД), включающей соответствующие средства методического, аппаратного, метрологического и программно-математического обеспечения (ПМО), которые учитывают особенности объекта исследования.

Особенностью станков как ДС является функционирование их в динамическом режиме при наличии внешних и внутренних возмущающих случайных воздействий.

Основной характеристикой ДС является оператор, с помощью которого входные сигналы $U(t)$ преобразуются в выходную реакцию системы $Y(t)$:

$$\boxed{} \quad (1)$$

Здесь и далее входные и выходные сигналы ДС рассматриваются как векторы, имеющие соответственно размерности:

$$\boxed{} \quad (2)$$

где индекс T – знак транспонирования.

Входные сигналы $U(t)$ включают полезную составляющую $g(t)$ и помеху $x(t)$. Связь полезного сигнала и помех может быть аддитивной, мультипликативной, аддитивно-мультипликативной, либо иметь более сложную зависимость. Оператор $A(t, V)$ зависит от времени t и вектора параметров $V = (V_1, V_2, \dots, V_n)^T$, характеризующих ТС системы.

Под ТС понимают совокупность подверженных изменению в процессе производства и эксплуатации свойств ДС, характеризующих определенными признаками, установленными технической документацией. Эти признаки могут иметь количественное и качественное выражение. Количественно выраженные признаки принято называть параметрами технического состояния (ТС) системы. Естественно, что эти параметры должны быть наблюдаемыми (контролируемыми) в процессе производства и эксплуатации и обеспечить объективную оценку ТС системы (станка).

Для определения вида ТС станка на его параметры устанавливают определенные технические нормы. К ним относятся: номинальное значение параметра V_o , нижнее V_n и верхнее V_v , предельно допустимые его значения, нижний $D_n = V_o - V_n$ и верхний $D_o = V_v - V_o$ допуски на параметр.

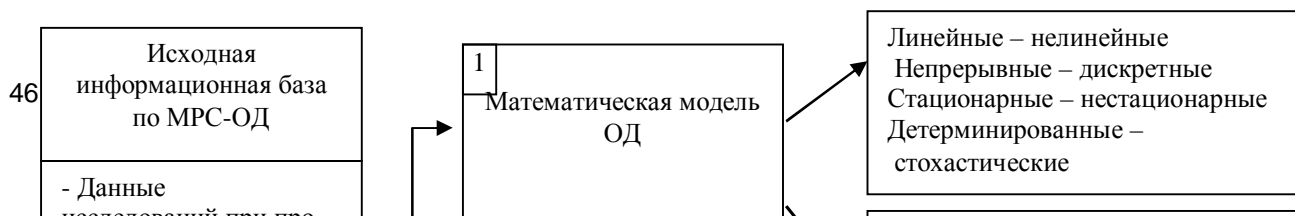
В зависимости от степени соответствия параметров ТС установленным нормам различают следующие виды ТС объектов машиностроения: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное и предельное.

Исправное (S_o) – это состояние изделия, при котором все его определяющие параметры соответствуют требованиям технической документации. Выход хотя бы одного из указанных параметров за пределы допусков переводит МРС в неисправное состояние ($\overline{S_o}$). Работоспособное (S_p) состояние – все основные параметры станка находятся в пределах допусков. Выход хотя бы одного из основных параметров за пределы допусков переводит объект в неработоспособное состояние ($\overline{S_p}$). Предельное (S_{np}) – это такое состояние станка, при котором его дальнейшее применение по назначению, либо восстановление исправного (работоспособного) состояния невозможно или нецелесообразно. Дополнением к предельному состоянию является состояние (S_{np}), в котором возможна эксплуатация станка. Между рассмотренными состояниями справедливо следующее логическое отношение:

$$S_o \subset S_p \subset \overline{S_{np}} \quad (3)$$

На рис.1 показана схема основных состояний и возможных переходов МРС в эти состояния. Отказы, неисправности и поврежденное МРС в процессе эксплуатации возникают как случайные события и обусловлены случайными изменениями параметров технического состояния.

Таким образом, с точки зрения глубины диагностирования различают задачи контроля (обнаружения неисправности) и диагностирования (локализации дефекта); первая задача выполняется также и при различных испытаниях.



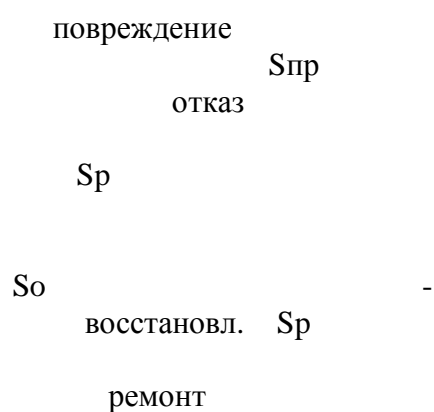


Рис. 1. Формирование теоретических основ на этапах организации контроля диагностирования и испытаний MPC

Совокупность задач, решаемых при определении ТС МРС на понятийном уровне, сформулированы в качестве ряда последовательных этапов организации и проведения контроля, диагностирования и испытаний (КДИ) (рис. 1). **На первом этапе** формулируется математическая модель объекта КДИ, в которой описываются основные режимы его работы и особенности функционирования. В частности, объект может быть линейным или нелинейным, стационарным или нестационарным, непрерывным или дискретным, может быть описан с помощью дифференциальных уравнений, передаточных функций, частотных характеристик, уравнений в пространстве состояний и т.д.

На втором этапе формулируется цель КДИ. Она может состоять в определении ТС объекта, оценке его исправности, работоспособности, правильности функционирования, получении качественной или количественной информации о его характеристиках, отказах или дефектах (вид, место, величина). С точки зрения глубины диагностирования различают обнаружение отказа, когда требуется вынести одно из двух суждений: «объект исправен» или «объект неисправен», и локализацию (поиск) отказа, когда требуется с заданной степенью точности (глубиной поиска отказа) указать место неисправности.

На третьем этапе осуществляется построение диагностической модели объекта, наиболее полно отражающей цель исследований при организации КДИ, а модели контроля и испытаний вполне корректно можно рассматривать как частные случаи или усеченные варианты диагностической модели.

Таким образом, сформулируем понятие «диагностическая модель» – это математическая модель объекта (станка), учитывающая возможные источники отказов, дефектов и погрешностей (модель объекта в совокупности с моделью отказов). При этом реальные погрешности, отказы и дефекты обычно отображаются в модели опосредованно в виде дополнительных входных сигналов или в виде изменения некоторых параметров, например, коэффициентов уравнений.

На четвертом этапе построенная модель используется для анализа диагностируемости, т.е. для выявления множества ненаблюдаемых отказов (дефектов), классов эквивалентных и неразличимых дефектов, оценки чувствительности диагностирования. На этом этапе речь может идти о потенциальных характеристиках диагностируемости, без привязки к конкретному методу контроля или набору диагностических признаков.

На пятом этапе выбираются конкретные диагностические признаки, под которыми понимаются характеристики объекта, используемые для определения его ТС. К ним относим, во-первых, характеристики и параметры объекта, определяемые целью исследований при КДИ, и, во-вторых, переменные и параметры, подлежащие прямому измерению. В технической диагностике параметры называют прямыми и косвенными диагностическими признаками [3]. Выбор совокупности непосредственно измеряемых диагностических параметров представляет собой ответственный этап, от которого во многом зависят качество, точность и эффективность всей СКД станка. Требования, которым должны удовлетворять измеряемые параметры, можно сформулировать в виде принципа «трех И»: измеримость, информативность, инвариантность.

Измеримость параметра означает, что он должен допускать возможность непосредственного измерения с помощью соответствующего датчика (вибрации, температуры, перемещение скорости и т.д.). Информативность параметра означает, что он должен нести существенную информацию об отказах (дефектах) и допускать возможность количественного определения их характеристик. Инвариантность параметра означает, что он должен иметь малую (в идеале – нулевую) чувствительность к шумам и другим возмущающим воздействиям.

Изложенное выше проиллюстрируем диаграммой, изображенной на рис. 2, на которой выделены множества измеренных, информативных и инвариантных параметров МРС. Если пересечение этих трех множеств не пусто, то их общая часть содержит параметры, удовлетворяющие всем требованиям КДИ. В противном случае приходится удовлетворять в первую

очередь требованию измеримости, а в отношении двух других требований идти на разумный компромисс. Такие параметры для исследуемого класса объектов можно корректно представить как обобщенные диагностические параметры. Именно на основе их измерений целесообразно строить СКД, эффективную для станков различного назначения.

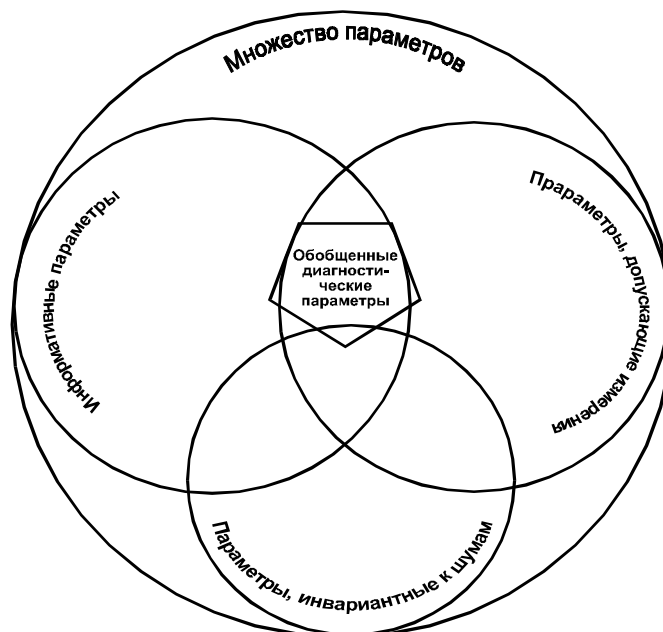


Рис. 2. Взаимосвязь измеряемых параметров в пространстве состояний станка

Шестой этап связан с выбором метода КДИ и синтезом СД. Этот этап заканчивается объединением всех средств в единую систему и формированием на этой основе аппаратной части СКД. Исходя из задач КДИ и на основе положений технической диагностики, рассмотренных в [1, 2], выделяем функциональное и тестовое диагностирование. Как правило, первое из них выполняется в рабочем режиме, а второе – в специальном режиме при подаче на вход системы тестовых воздействий, что особенно характерно, например, для различных испытаний станков.

Характерным примером функционального диагностирования являются методы оценивания состояния и методы аналитической избыточности. Суть диагностирования на основе аналитической избыточности состоит в проверке выполнения некоторого аналитического соотношения, связывающего переменные системы. Примером таких соотношений служат первые интегралы ДС, которые должны сохранять свое значение в любой момент времени. Если такие соотношения отсутствуют, их можно получить за счет введения избыточности в исходную систему.

Типичным примером тестового диагностирования являются методы оценивания параметров, развитые в теории идентификации. Диагностирование проводится путем сравнения экспериментальных оценок параметров, полученных в ходе испытаний, с их эталонными значениями. На данном этапе формулируется алгоритм обработки результатов КДИ.

Седьмой и восьмой этапы относятся к непосредственному проведению измерений, формированию и отладке ПМО на базе математической (в том числе статистической) обработки результатов измерений и получения результата КДИ. Цель обработки косвенных диагностических признаков состоит в отбраковке недостоверных результатов, фильтрации помех, пересчете данных прямых измерений в результат и оценке погрешности. Итогом является получение результата диагностирования (принятие решения об отнесении объекта к одному из неисправных состояний или информация о характеристиках дефектов). Одновременно может

оцениваться достоверность диагностирования, например, путем указания вероятностей ошибок первого и второго рода (вероятностей ложного обнаружения и пропуска отказа или дефекта).

Далее по результатам диагностирования принимается решение о ремонте или замене неисправного функционального узла (ФУ) либо об изменении технологического режима обработки на данном станке и другие мероприятия, относящиеся к сфере обеспечения работоспособности, технологической надежности и безопасности, и которые уже выходят за рамки технической диагностики. Следует заметить, что в литературе по технической диагностике большое количество работ посвящено исследованию систем управления и сложных электронных устройств, до сих пор существует известный терминологический разнобой. Значительно менее развита область диагностики технологического оборудования, что проанализировано в [2, 3]. Используемая терминология в значительной степени определяется традициями этих предметных областей. Имеется также ряд отличий в использовании одних и тех же терминов отечественными и зарубежными специалистами по диагностике. В частности, это касается трактовки понятия «диагностическая модель», которая является предметом рассмотрения в данной главе.

Под *диагностической моделью* в отечественной литературе принято понимать математическую модель объекта диагностирования, дополненную моделью отказов (дефектов). Это заметно отличается от «западной» трактовки диагностической модели как совокупности соотношений, связывающих диагностические признаки и отказы (дефекты).

В этой связи формулировку диагностической модели, суть которой сводится к созданию теоретической основы определения и оценки технического состояния МРС, целесообразно представить в виде соответствующей концепции, построенной с учетом системных свойств станка как ОД [1]. Анализ источников научно-технической информации по проблеме организации КД и опыт собственных исследований, изложенные в [2], позволяют представить данную концепцию как совокупность четырех взаимосвязанных аспектов решаемых задач, характеризующихся иерархической структурой функциональных подсистем МРС или пересекающимися подмножествами измеряемых параметров (сигналов) станка либо различными скоростью или свойствами физических процессов, протекающих в его подсистемах. В соответствии с указанной концепцией в данной главе рассматривается подход к построению диагностических моделей станков различного назначения как ДС.

Представленный в [1, 3] системный подход к объекту (современным МРС) как сложной технической ДС, анализ теоретического подхода к проблеме КДИ для объектов, содержащих подсистемы, различные по принципу действия, физическим процессам, сложным самостоятельным многокоординатным функциям, а также формирование идеологии организации КДС в виде ряда этапов позволяют корректно применить математический аппарат, развитый в современной теории управления для описания ДС. Этот аппарат основан на методе пространства состояний (ПС).

Математическая модель ДС, в качестве которой рассматривается станок, в ПС имеет вид

$$\dot{X} = AX + B U, \quad Y = CX + D U, \quad (4)$$

где X – векторы входа, выхода и состояния; $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$ переменные матрицы соответствующей размерности, причем $n \times n$ – матрица A характеризует собственную динамику объекта, $n \times r$ – матрица B – структуру его входного устройства, $m \times n$ – матрица C – структуру выходного устройства, $m \times r$ – матрица D – структуру нединамической (алгебраической или прямой) связи входа с выходом.

ДС, описываемая уравнениями вида (4), содержит переменные матрицы, элементы которых (или часть элементов) являются функциями времени. Такие системы называются нестационарными. Для стационарной системы матрицы не зависят от времени. В этом случае (4) преобразуется к виду

$$\boxed{\phantom{\text{matrix equation}}}$$
 (5)

Во многих работах, например [3], показано, что сложные технические системы (СТС), в том числе и станочные объекты, содержащие электромеханические, гидравлические, пневматические и другие ФУ, можно описать совокупностью дифференциальных уравнений 1-го порядка. Реальные СТС (станочные объекты) представляются в виде ДС n -го порядка.

Модель ДС n -го порядка можно представить следующим образом:

$$\boxed{\phantom{\text{matrix equation}}}$$
 (6)

где матрицы $\boxed{\phantom{\text{matrix}}}$ имеют отличный от (5) вид.

Тогда общее решение уравнения (6) стационарной системы записывается как

$$\boxed{\phantom{\text{matrix equation}}}$$
 (7)

Модель станочной системы как ДС с детерминированными характеристиками представляется в виде уравнений (6). В общем случае, если рассматривать станок как объект с детерминированными и стохастическими характеристиками, так как на него могут при работе воздействовать различные случайные возмущения и помехи (тепловые, вибрационные электрические и т.д.), модель вида (6) преобразуется к виду

$$\boxed{\phantom{\text{matrix equation}}}$$
 (8)

где $\boxed{\phantom{\text{matrix}}}$ – случайный процесс, например, типа «белый шум» [3].

Основываясь на уравнениях (8), можно получить структурную схему модели объекта с учетом детерминированных и стохастических характеристик, показанную в [3].

Таким образом, математическая модель станка как ДС на базе метода ПС вида (5) и (6) в подавляющем большинстве практических случаев при наложении ограничений возможно свести к достаточно простой модели, например линейной, непрерывной, стационарной, детерминированной или с учетом стохастических характеристик вида (8). Математический аппарат для таких моделей достаточно хорошо разработан. Метод ПС позволяет рассматривать и более сложные модели в отдельных случаях с установленными ограничениями, причем решение уравнений модели производить не аналитически, а цифровыми методами на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добряков В.А. Совершенствование гибкого обслуживания по состоянию при эксплуатации технологических объектов управления / В.А. Добряков // Вестник СГТУ. 2009. №3 (41). Вып. 2. С. 78-81.
2. Добряков В.А. Современный подход к гибкому обслуживанию технологических объектов управления в автоматизированном производстве / В.А. Добряков // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ. 2010. С. 41-46.
3. Контроль в системах автоматизации технологических процессов / А.А. Игнатьев, М.В. Виноградов, В.А. Добряков др. Саратов: СГТУ, 2001. 124 с.

Добряков Владимир Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Dobryakov Vladimir Anatolevich – Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of chair «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 20.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.9.015:629.12.002

Н.В. Ермольчева, А.В. Королев, Б.С. Орлов

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДИСКРЕТНОГО ВИБРАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ
С СОЗДАНИЕМ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА
С ТРЕБУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Рассматривается механизм работы устройства для дискретного вибрационного резания и процесс образования частично регулярного микрорельефа на поверхности деталей. Получены формулы для оценки нестандартных параметров микрорельефа.

Частично регулярный микрорельеф, параметры микрорельефа, дискретное вибрационное резание

N.V. Ermolcheva, A.V. Korolyov, B.S. Orlov

**DISCRETE VIBRATING DEVICE FOR CUTTING THE ESTABLISHMENT REGULAR
MICRORELIEF WITH THE REQUIRED PARAMETERS**

Mechanism of the device for the discrete vibratory cutting, and the formation of a partly regular microrelief on the surface of parts is considered. The formulas for the evaluation of non-standard parameters of the microrelief.

Partly regular microrelief, parameters of the microrelief, discrete vibratory cutting

Поскольку технологический микрорельеф поверхностей деталей оказывает весьма важное влияние на эксплуатационные характеристики деталей приборов и машин, в том числе на прирабатываемость, трение и износостойкость трущихся пар, плавность хода, герметичность, пылеудаляемость и другие [1], важной задачей в области качества поверхности является изыскание и исследование методов обработки деталей, обеспечивающих получение на поверхностях регулярных микрорельефов.

Идея состояла в разработке универсального устройства для вибрационной обработки. При этом было создано приспособление, позволяющее получать на обрабатываемой поверхности регулярный микрорельеф в виде непрерывных синусоидальных канавок или в виде дискретных углублений разнообразной серповидной формы (рис. 1) [2].

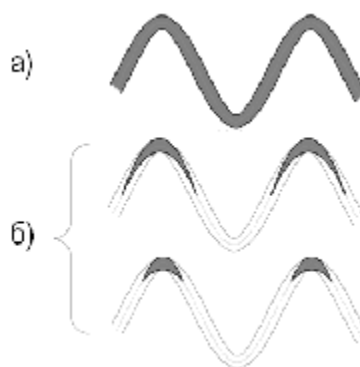


Рис. 1. Схема образования микрорельефа различных видов:
а) синусоидальные канавки; б) канавки серповидной формы

Устройство для вибрационной обработки поверхностей деталей (рис. 2) содержит основание 1, на котором установлены корпус 8 с державкой 4, на которой имеется Г-образный участок 2 с инструментом (резцом) 3 и привод возвратно-качательного движения державки 4. Участок 2 с инструментом 3 можно поворачивать на угол α вокруг оси державки 4 и фиксировать винтом 9.

Для заданной формы регулярного микрорельефа на обрабатываемой поверхности детали осуществляется поворот Г-образного участка державки на требуемый угол α в диапазоне $0^\circ \dots 180^\circ$ ($\alpha=90^\circ$ – для микрорельефа в виде непрерывных синусоидальных канавок, $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ – для микрорельефа в виде прерывистых синусоидальных канавок) после чего он фиксируется фиксатором. Инструмент 3, закрепленный на Г-образном участке державки, подводится к поверхности обрабатываемой детали до соприкосновения и поджимается. Момент соприкосновения инструмента с поверхностью обрабатываемой детали и требуемая глубина канавок и дискретных микролунок определяются индикатором 7, который соединен с державкой 4. При вращении кулачка 5 от электродвигателя 6 вызывается возвратно-качательное движение вибрирующей части державки 4 за счет деформации участка с малой поперечной жесткостью. В зависимости от угла поворота Г-образного участка державки в каждый период возвратно-качательного движения державки инструмент может не выходить или выходить за пределы обрабатываемой поверхности, в результате чего на ней образуется регулярный микрорельеф в виде непрерывных или прерывистых синусоидальных канавок соответственно. Величина угла и направление поворота Г-образного участка державки позволяют изменять величину и зону прерывания исходной синусоидальной канавки.

Ранее получены формулы для оценки стандартизированного параметра ЧРМР, каковым является относительная площадь поверхности микролунок F_k (ГОСТ 244773-81) [3]. Однако помимо расчета стандартизированных параметров ЧРМР поверхностей при решении задачи их оптимизации в ряде случаев возникает необходимость расчета и других параметров, в частности удельного объема микролунок и коэффициента объемного заполнения.

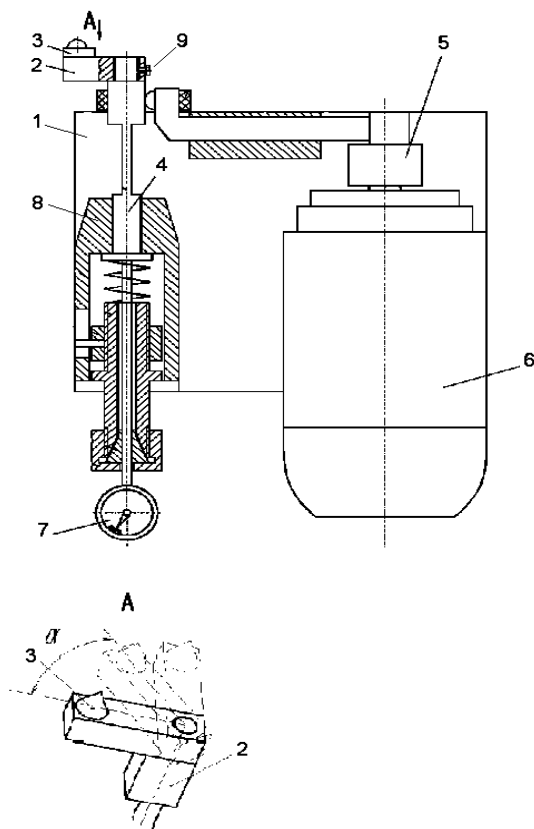


Рис. 2. Устройство для вибрационной обработки поверхностей

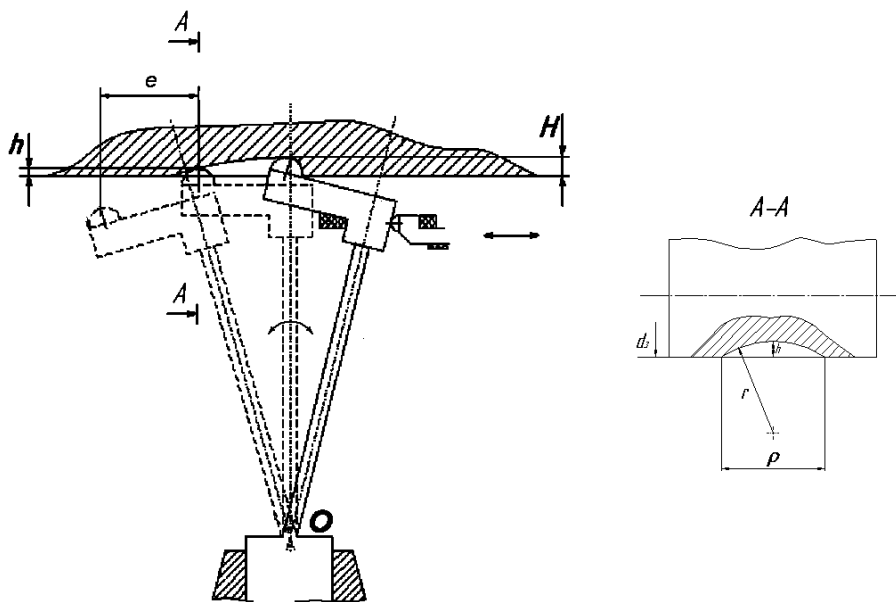


Рис. 3. Схема формирования микролунки

Эти расчеты проводятся в предположении, что в резании участвует закругленная часть вершины резца с радиусом r , а задняя поверхность резца выполнена в виде сферы радиуса r .

В поперечном сечении микролунка имеет форму сегмента (сечение А-А рис. 3), где H – максимальная глубина микролунки (стандартизированный параметр ЧРМР), устанавливаемая при наладке оборудования в крайнем правом положении осциллирующего резца.

За период осцилляции резца T глубина микролунки h изменяется от 0 до H и определяется по формуле

$$h = H \cdot \sin \frac{2p}{T} t . \quad (1)$$

Объем микролунки представляет собой величину

$$V = \int_a^b S(x) dx , \quad (2)$$

где $S(x)$ – площадь поперечного сечения; a, b – пределы интегрирования.

В нашем случае $a = 0, b = T/2, x = v \cdot t$, следовательно $dx = v dt$, где v – окружная скорость заготовки.

Так как площадь сечения (сегмента) имеет вид

$$S(t) \cong \frac{2}{3} h \cdot r ,$$

где $r = 2\sqrt{2rh}$ – хорда сегмента,

то объем микролунки

$$\begin{aligned} V &= v \cdot \int_0^{T/2} \frac{4}{3} H \cdot \sin \frac{2p}{T} t \cdot \sqrt{2rH \cdot \sin \frac{2p}{T} t} dt = \\ &= \frac{4}{3} vH \cdot \sqrt{2rH} \cdot \int_0^{T/2} \sin \frac{2p}{T} t \cdot \sqrt{\sin \frac{2p}{T} t} dt . \end{aligned} \quad (3)$$

Приведение интеграла в уравнении (3) к стандартной форме, для которой имеются таблицы, довольно сложно, поэтому он может быть вычислен по формуле Симпсона, что в большинстве практических случаев допустимо.

В итоге получим

$$V = \frac{4}{9} vTH \cdot \sqrt{2rH} . \quad (4)$$

Выразив объем через $k = \frac{2pe}{Tv}$, получим

$$V = \frac{8pe}{9k} H \cdot \sqrt{2rH} . \quad (5)$$

Обозначим через V_1 объем всех микролунок на поверхности цилиндра за один его оборот и через v_k – удельный объем микролунок, т.е. отношение объема микролунок к площади $A_{бок}$ – боковой поверхности идеального цилиндра:

$$v_k = \frac{V_1}{A_{бок}} \quad (6)$$

В нашем случае $V_1 = \frac{8pe}{9k} H \cdot \sqrt{2rH} \cdot i$, $A_{бок} = p \cdot d_3 \cdot S_{np}$,

где $k = \frac{2ei}{d_3}$; $i = \frac{n_{ов.х}}{n_3}$ – число циклов осцилляции резца за один оборот заготовки; d_3 – диаметр обрабатываемой поверхности; e – амплитуда осцилляции резца; S_{np} – продольная подача.

Тогда

$$v_k = \frac{8peH \cdot \sqrt{2rH} \cdot i}{9kp \cdot d_3 \cdot S_{np}} = \frac{8peH \cdot \sqrt{2rH} \cdot i}{9 \cdot (2 \cdot e \cdot i / d_3) \cdot p \cdot d_3 \cdot S_{np}} = \frac{4H \cdot \sqrt{2rH}}{9 \cdot S_{np}} \quad (7)$$

Коэффициент объемного заполнения рассчитывается по формуле

$$K_v = \frac{V_{к.с.} - V_1}{V_{к.с.}} \quad (8)$$

где V_1 – объем всех микролунок на поверхности цилиндра, $V_{к.с.} = p \cdot H \cdot d_3 \cdot S_{np}$ – объем кольцевого слоя, ограниченного цилиндрической поверхностью.

Тогда

$$K_v = 1 - \frac{V_1}{V_{к.с.}} = 1 - \frac{4pH \cdot \sqrt{2rH} \cdot d_3}{9p \cdot H \cdot d_3 \cdot S_{np}} = 1 - \frac{4\sqrt{2rH}}{9S_{np}} \quad (9)$$

Полученные зависимости нестандартных параметров микрорельефа обеспечивают возможность решения задач технологического обеспечения дискретного вибрационного резания для образования поверхностей с требуемыми параметрами ЧРМР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю.Г. Шнейдер. Л.: Машиностроение, 1972. 240 с.
2. Патент на полезную модель № 96810 Устройство для вибрационной обработки поверхностей / Б.С. Орлов, Д.В. Черепанов, А.А. Скрипкин, Н.В. Ермольчева. Бюл. № 23, 20.08.2010.
3. Орлов Б.С. К вопросу расчета параметров частично регулярного микрорельефа поверхности деталей при дискретном вибрационном резании / Б.С. Орлов, Н.В. Ермольчева // Вестник СГТУ. 2009. № 3 (41). Вып. 2. С. 147-150.

Ермольчева Надежда Викторовна – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Ermolcheva Nadezhda Viktorovna – post-graduate faculty «Technology of mechanical engineering» Saratov State Technical University

Королев Альберт Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Korolev Albert Viktorovich – doctor of technical sciences, professor, head. Department «Technology of mechanical engineering» Saratov State Technical University

Орлов Борис Степанович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета

Orlov Boris Stepanovich – Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of chair «Priborostroenie» the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 04.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 69.002.05

В.М. Земсков**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВИБРАЦИОННОГО НАКОНЕЧНИКА
ДЛЯ ПРОХОДКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН**

Представлена математическая модель, описывающая параметры движения вибрационного наконечника с центробежным возбудителем колебаний в плоскости, перпендикулярной оси проходки при установившемся режиме работы. Предлагаются зависимости для определения угла сдвига фаз и амплитуды колебаний наконечника в зависимости от свойств грунта.

Моделирование, вибрационный наконечник, амплитуда, сдвиг фаз, грунт, диссипация

V.M. Zemskov**MODELLING OF MOVEMENT OF THE VIBRATING TIP
FOR A MOLING OF HORIZONTAL CHINKS**

The mathematical model describing parameters of movement of a vibrating tip with the centrifugal activator of fluctuations in a plane of a perpendicular axis of a moling at the established operating mode is presented. Dependences for definition of a corner of shift of phases and amplitude of fluctuations of a tip depending on properties of a ground are offered.

Modeling, vibrating tip, amplitude, shift of phases, ground, dispersion

Проходка горизонтальных скважин способом вибрационного прокола при бестраншейной прокладке коммуникаций позволяет значительно снизить осевое усилие подачи по сравнению со статическим проколом за счет снижения трения между частицами грунта и внедряемой трубы о грунт. Известны способы вибрационного прокола с осевыми, продольно-вращательными и круговыми колебаниями рабочего наконечника.

Способ вибрационного прокола с осевыми колебаниями, несмотря на снижение напорного усилия до 8-10 раз, характеризуется конструктивной трудностью в создании надёжных вибраторов направленного действия, малой эффективностью вибрационного прокола при проходке грунтов с каменистыми включениями, громоздкостью и повышенной энергоёмкостью. Вибрационный прокол с продольно-вращательными колебаниями трубы показал снижение нажимных усилий в 3,5 раза по сравнению с осевыми колебаниями. Однако установки, реализующие способ вибрационного прокола с осевыми и продольно-вращательными колебаниями, не получили практического распространения.

В Балаковском ИГТУ предложена и разрабатывается технология образования горизонтальных скважин, использующая вибрационный наконечник с круговыми колебаниями в плоскости, перпендикулярной оси проходки. Выполненные экспериментальные исследования позволяют характеризовать предложенный способ вибрационного прокола с колебаниями перпендикулярно оси проходки следующими достоинствами: энергоёмкость процесса проходки горизонтальных скважин на глинах – 17 МДж/м³, на песках – 30 МДж/м³, при скоростях проходки 75-85 м/ч; снижение трудозатрат по сравнению со статическим проколом составляет 30-50 % [1].

Рабочий наконечник установки для вибрационного прокола совершает сложное колебательное движение: угловые колебания в плоскости оси проходки и круговые в плоскости перпендикулярной оси проходки. Колебания наконечника при одновременном поступательном

движении в направлении проходки интенсифицируют процесс уплотнения грунта в стенки при образовании скважины, так как энергия колебаний, передаваемая в массив грунта, способствует снижению коэффициента внутреннего трения и сцепления, что уменьшает величину критического напряжения для изменения структуры грунта, и в конечном итоге уменьшает напорную силу. Конструктивно вибровозбудитель наконечника выполнен в виде центробежного преобразователя электрической энергии или энергии сжатого воздуха в механическую энергию колебаний. Таким образом, рабочий наконечник установки вибрационного прокола генерирует гармонические колебания. Несмотря на относительную конструктивную простоту вибрационного наконечника, он образует с грунтом сложную динамическую систему, и для того, чтобы грамотно проектировать и эффективно применять вибрационные наконечники, необходимо, прежде всего, изучить процесс его взаимодействия с грунтом.

В рамках данной статьи представлена математическая модель, описывающая параметры движения наконечника с центробежным возбудителем колебаний в плоскости, перпендикулярной оси проходки при установившемся режиме работы.

Разрабатываемая математическая модель должна учитывать различные режимные параметры вибрационного наконечника, определять взаимосвязи конструктивных и режимных параметров при действии сил со стороны грунта. Для описания установившегося режима движения вибрационного рабочего наконечника в плоскости, перпендикулярной оси проходки, применим принцип Германа-Эйлера-Даламбера для несвободной механической системы:

$$\sum \bar{P}_i + \sum \bar{R}_i + \sum \bar{\Phi}_i = 0, \quad (1)$$

где $\sum \bar{P}_i$ – главный вектор активных (задаваемых) сил; $\sum \bar{R}_i$ – главный вектор реакции связей; $\sum \bar{\Phi}_i$ – главный вектор сил инерции; i – число степеней свободы системы.

По этому принципу все связи заменим действием сил со стороны грунта и рассмотрим механическую систему как свободную. Для построения математической модели примем следующие допущения:

1. Вибрационный наконечник работает в зарезонансном режиме.
2. Конструктивные элементы вибрационного рабочего наконечника абсолютно жесткие.
3. Грунт во всех направлениях движения вибрационного наконечника характеризуется как однородный.

Первое допущение основано на данных, представленных в [2]. Как правило, грунт, подлежащий разработке при проходке горизонтальных скважин, находится в уплотненном состоянии, для которого диапазон резонансных частот составляет 13-27 Гц (800-1600 кол/мин). В [1] было определено, что для создания требуемых критических ускорений в массиве грунта при проходке скважин способом вибрационного прокола частота колебаний должна быть более 30 Гц.

Для составления уравнений, описывающих движение вибрационного наконечника в грунте, рассмотрим расчётную схему (рис. 1) движения системы в зарезонансном режиме (мгновенное состояние системы). Так как частота возмущающей силы $w_{до}$ больше частоты собственных колебаний системы w_c , силы сопротивления по осям X и Y , действующие со стороны грунта, не компенсируют действие инерционных сил, и равновесное состояние системы не поддерживается. Для уравновешивания сил сопротивления со стороны грунта система производит перестроение через изменение относительного положения дебаланса, смещая его на угол сдвига фаз j относительно линии действия инерционной силы F_n^{abc} массы вибрационного рабочего наконечника.

Система уравнений, описывающих динамическое равновесное состояние системы, представлена в виде

$$\begin{cases} \Sigma F_y = F_n^{abc} - F_{дб}^{abc} \cos a - F_{гр}^y = 0, \\ \Sigma F_x = F_{гр}^x - F_{дб}^{abc} \sin a = 0, \\ \Sigma M_0 = M_{дб} + M_p - F_{гр}^x (R_n + A_{\max}) = 0. \end{cases}, \quad (2)$$

где F_n^{abc} – сила инерции массы наконечника m_1 в абсолютном движении относительно полюса O ; $F_{дб}^{abc}$ – сила инерции массы дебаланса $m_{дб}$ в абсолютном движении относительно полюса O ; a – угол поворота центра тяжести дебаланса относительно полюса O ; $F_{гр}^y$ – сила сопротивления грунта; $F_{гр}^x$ – сила сцепления между грунтом и корпусом вибрационного рабочего наконечника; $M_{дб}$ – вращающий момент, приложенный к валу дебаланса; M_p – реактивный момент на корпусе вибрационного рабочего наконечника; R_n – радиус наружной поверхности вибрационного рабочего наконечника; A_{\max} – максимальная амплитуда колебаний центра вибрационного наконечника O_1 относительно полюса равновесного состояния системы O .

Момент от силы сцепления $F_{гр}^x$ между грунтом и корпусом вибрационного рабочего наконечника уравновешивается реактивным моментом M_p , создаваемым стабилизаторами (рис. 2) на наружной поверхности цилиндрической части корпуса наконечника.

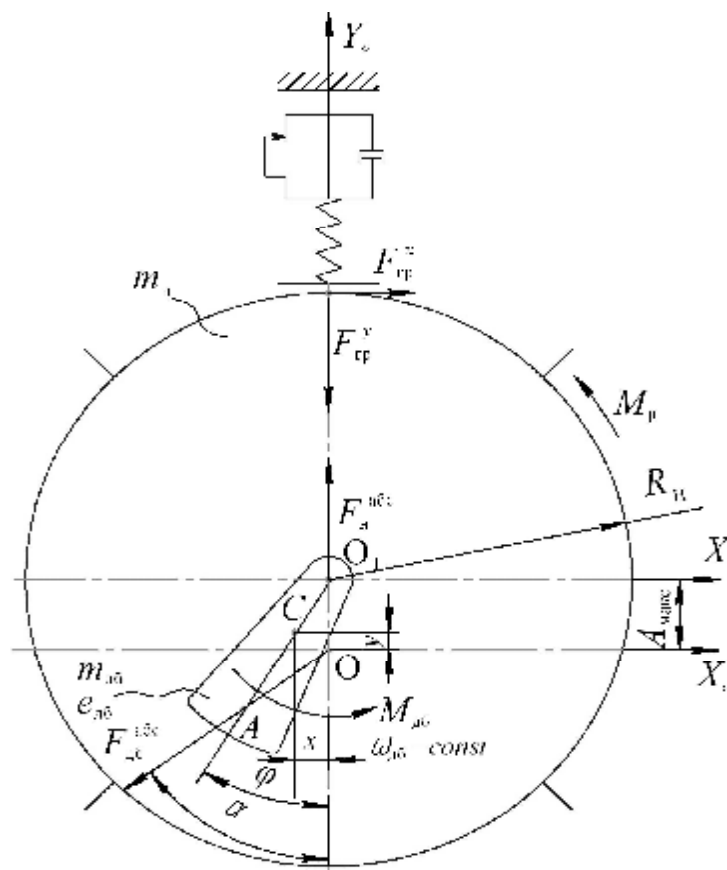


Рис. 1. Мгновенное состояние колеблющейся системы:
 O – полюс равновесного состояния системы «наконечник – грунт»; O_1 – ось вращения дебаланса, совпадающая с осью вибрационного рабочего наконечника; C – центр масс колеблющейся системы; A – центр тяжести дебаланса



Рис. 2. Общий вид вибрационного рабочего наконечника со стабилизаторами на цилиндрической части

С учётом последних зависимостей после математических преобразований система уравнений (2) переписывается в виде:

$$\begin{cases} (m_n + m_{дб})A_{макс}w_{дб}^2 - P_{дб}\cos j - F_{гр}^y = 0, \\ F_{гр}^y f - P_{дб}\sin j = 0, \\ M_{дб} + M_p - F_{гр}^y f(R_n + A_{макс}) = 0. \end{cases}, \quad (4)$$

где $P_{дб} = m_{дб}e_{дб}w_{дб}^2$ – возмущающая сила дебаланса относительно собственной оси вращения O_1 .

Решая полученные уравнения относительно амплитуды $A_{макс}$ и угла сдвига фаз j , получим

$$\begin{cases} A_{макс} = \frac{F_{гр}^y + P_{дб}\cos j}{(m_n + m_{дб})w_{дб}^2}, \\ j = \arcsin \frac{F_{гр}^y f}{P_{дб}}, \\ M_{дб} + M_p = F_{гр}^y f(R_n + A_{макс}). \end{cases}. \quad (5)$$

Из второго выражения системы уравнений (5) определяется угол сдвига фаз в зависимости от силы сопротивления грунта. При образовании скважины механическая энергия вибратора наконечника рассеивается в массиве грунта (диссипация энергии). Сила сопротивления грунта $F_{гр}^y$ определяется диссипативными свойствами грунта, которые зависят как от принятой реологической модели грунта, так и от его физических свойств. Диссипация энергии в грунтах существует в виде кулонова трения и жидкостного (вязкостного) трения. В соответствии со вторым выражением системы уравнений (5) значение угла сдвига фаз j возрастает при увеличении диссипативной силы грунта $F_{гр}^y$. Из этой зависимости следует, что для глины значение угла сдвига фаз j будет достигать максимального значения, что подтверждается и экспериментальными данными: рассеивание энергии колебаний в глинах происходит более интенсивно, чем в песках, другими словами, глинистые грунты характеризуются более высокими диссипативными свойствами по сравнению с песчаными грунтами.

Первое выражение полученной системы уравнений позволяет определить амплитуду колебаний корпуса вибрационного наконечника в зависимости от силы сопротивления грунта $F_{гр}^y$ и угла сдвига фаз j , которые, в свою очередь, также определяются диссипативными свойствами грунта.

Полученные уравнения движения позволяют оценить величину развиваемых вибрационным наконечником ускорений колебаний в массиве грунта на основе определения угла сдвига фаз j и максимальной амплитуды $A_{\text{макс}}$ и в конечном итоге определить мощность, необходимую для привода вибратора наконечника для проходки горизонтальных скважин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснолудский Н.В. Обоснование параметров вибрационного наконечника для проходки горизонтальных скважин способом прокола: дис. ... канд. техн. наук / Н.В. Краснолудский. Орел, 2010. 158 с.

2. Форсблад Л. Вибрационное уплотнение грунтов и оснований / пер. с англ. И.В. Гагариной. М.: Транспорт, 1987. 188 с.

Земсков Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины» Балаковского института техники, технологии и управления (филиала) Саратовского государственного технического университета

Zemskov Vladimir Mihajlovich – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of « Hoisting-and-transport, building and road machines» of Balakovo Institute of Engineering, Technology and Management (affiliated branch) of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 23.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.791.03-52

А.А. Иванов, П.Ю. Бочкарев

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ СОСТАВЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНООБРАБОТКИ В МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Дается содержательная постановка и формализация задачи планирования в многономенклатурной производственной системе механообработки. Рассматривается общая математическая модель распределения ресурсов. Описываются критерии оптимальности расписаний. Предлагается совокупность методик поиска расписаний по полученной модели. Рассматривается возможность внедрения методик как подсистемы в системе автоматизированного планирования технологических процессов.

Планирование производства, многономенклатурное производство механообработки, Job Shop, реализация технологических процессов, автоматизированное планирование

A.A. Ivanov, P.Yu Bochkarev

FORMALISING OF THE OPTIMAL SCHEDULING PROBLEM IN MULTINOMENCLATURE PRODUCTION OF MACHINING PROCESS

Informative definition and formalization of the scheduling problem in multinomenclature industrial system of machining process is given. The general mathematical model is considered for resources distribution. An optimality scheduling criteria are described. The set of techniques for

solving the scheduling problem on the received model is offered. Possibility of implantation of techniques as subsystems in system of the automated planning of technological processes is considered.

Production scheduling, multinomenclature production of machining process, Job Shop, implementation of technological process, automated manufacturing planning

Современное машиностроение характеризуется преобладанием серийного и мелкосерийного производства [2, 3]. Доля выпускаемой продукции таких производств составляет порядка 70% от общего объема производства. Поэтому повышение эффективности серийного и мелкосерийного производства является на сегодняшний день актуальной задачей.

Одним из наиболее важных методов повышения эффективности производства является уменьшение времени производственного цикла, или, другими словами, уменьшение времени выполнения заказа. Уменьшения времени производственного цикла можно добиться разными путями, например, повышением производительности оборудования, снижением времени на подготовку производства. Однако неоптимально составленное расписание работы станочного оборудования может свести к нулю эффект от применения остальных методов, поэтому составление оптимального плана работы оборудования является одним из ключевых моментов повышения эффективности производства.

Для серийного и мелкосерийного производств задача составления оптимального расписания является наиболее актуальной [2, 3]. При таком типе производства сравнительно быстро прекращается изготовление одних видов выпускаемой продукции и налаживается освоение новых. Это приводит к увеличению номенклатуры изделий, и, как следствие, большую роль в составлении расписаний начинает играть время переналадки оборудования. Характерными особенностями таких производственных систем также являются:

- работа по заказам на большинстве предприятий независимо от ведомственной подчиненности и формы собственности;
- установленные сроки изготовления;
- возможность остановки работы производства для смены выполняемого заказа или др.;
- выделение приоритетных заказов из общего числа с возможностью их обработки без прерываний.

Составление расписания для такого типа производства является сложной задачей. Выполнение этой задачи для реального производства состоит не просто в создании адекватной модели производства, учитывающей все вышеперечисленные характеристики, и создании методов нахождения оптимального расписания для полученной модели. Важно также создание целой системы планирования, позволяющей получать все исходные данные о производственной системе (ПС) и имеющихся заготовках, учитывающей реальное состояние производственной ситуации, и способной анализировать все эти данные для создания оптимальных технологических процессов (ТП) для каждой детали (включающих маршрут обработки, время обработки, время переналадки в созданном маршруте). Из полученных таким образом ТП должно строиться расписание работы станочного оборудования. Такой подход позволит главным образом учитывать при планировании прерывания работы производства и практически без задержек создавать новое расписание для новой производственной ситуации.

Для решения поставленной задачи авторами была начата работа по созданию системы автоматизированного планирования технологических процессов (САПЛ-ТП). САПЛ-ТП полностью удовлетворяет требованиям к указанной выше системе планирования [3].

На рис. 1 представлена организационная структура создаваемой системы планирования, а также указаны все внутренние и внешние информационные потоки САПЛ-ТП. Внутри системы предполагается функциональное деление на подсистемы «Проектирование ТП» и

«Реализация ТП». Особенностью указанной системы является также возможность учета влияния изменений производственной ситуации.

В рамках действий, отнесенных к подсистеме «Проектирование ТП», выполняется оценка конструкторско-технологических особенностей деталей и формирование рационального варианта их изготовления, обеспечивающих возможность изготовления заданной номенклатуры деталей в конкретной производственной системе.

Подсистема «Реализация ТП» осуществляет (1) Сбор и обработку данных о Производственной системе, (2) Анализ изменений в Производственной Ситуации, и (3) Определение оптимальных планов реализации ТП. В свою очередь, как видно из рис. 1, (3) делится на три подзадачи: (а) Синтез и (б) Анализ возможных планов реализации технологических процессов, а также (в) Выбора Оптимального плана реализации технологического процесса.

Основной задачей подсистемы «Реализация ТП» является определение оптимального плана реализации ТП (оптимального расписания работы механообрабатывающего оборудования) на основе полной информации о технологическом процессе обработки каждой детали, поступающей из подсистемы «Проектирование ТП». Таким образом, процесс построения расписания работы механообрабатывающего оборудования становится полностью автоматизирован.

Вернемся к вопросу создания самого расписания работы станочного оборудования, или, если говорить с позиций САПЛ-ТП, к вопросу реализации ТП. Для реализации ТП необходимо формализовать исходную задачу, а для этого, в свою очередь, необходимо выполнить постановку задачи.

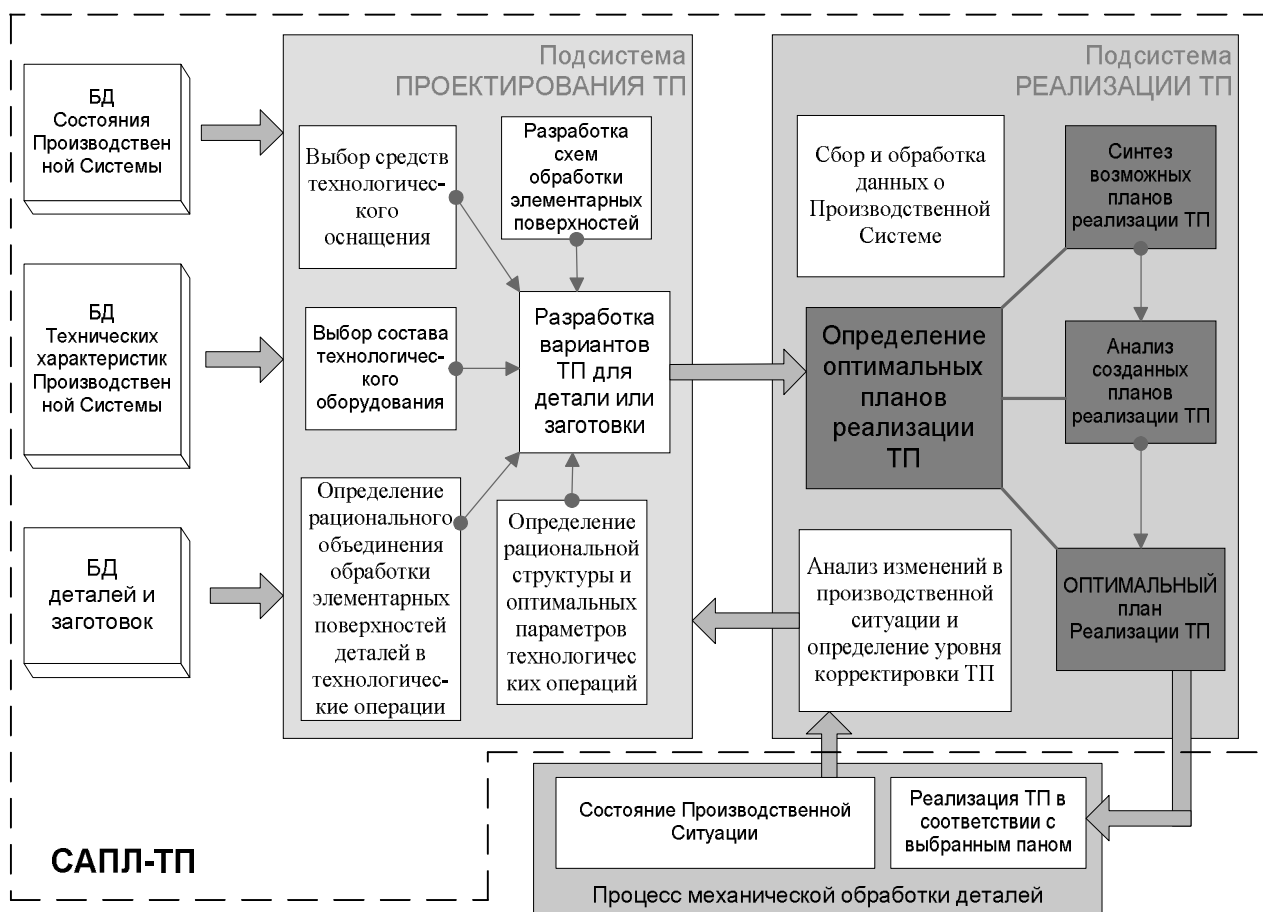
Исходя из указанных выше характеристик многономенклатурного производства, можно сделать вывод, что оценка качества плана реализации ТП для такого производства должна определяться основным критерием: общее время обработки всех партий деталей на станках (затраты на переналадку станков учитываются в этом критерии). Учитывая применение САПЛ-ТП, предполагается, что в начале периода планирования известен перечень деталей, подлежащих обработке. Детали могут быть сгруппированы в партии. Время обработки партии равно сумме времен обработки всех деталей в партии. Маршрут обработки детали представляет собой совокупность последовательных операций, выполнение которых осуществляется на назначенных станках. Единицы оборудования могут быть объединены в группы идентичных станков. Каждая деталь для своего выполнения должна пройти обработку последовательно всех операций, причем для каждой детали количество операций может быть различным. Прерывания в обработке партий деталей для остановки или передаче на другой станок не допускаются. Все детали доступны для обработки в течение всего периода обработки. Все станки также доступны для использования, однако в случае остановки некоторые станки могут быть исключены из расписания.

Время переналадки станка зависит как от текущей детали, так и от ее непосредственного предшественника на данном станке. Время транспортировки детали между станками предполагается учтенным во времени обработки. Устройства загрузки и выгрузки предполагаются бесконечной вместительности. Два последних требования предполагается включить в рассмотрение в дальнейших статьях авторов. Множество всех партий деталей разбито на группы с одинаковым приоритетом обработки. Требуется построить такое расписание выполнения работ на станках, чтобы суммарный критерий был минимальным при выполнении всех перечисленных выше требований. На производстве возможны остановки оборудования, однако эта проблема решается за счет использования САПЛ-ТП, и при формализации задачи не рассматривается.

После такой постановки задачи реализации ТП можно сказать, что в качестве формализации можно взять описание так называемой «задачи планирования в цеху» (в иностранной литературе Job Shop Scheduling Problem) с мультистадийной обработкой деталей и неидентичными маршрутами обработок [1]. В литературе, посвященной теории расписаний, эта модель является стандартной задачей планирования.

Далее приведем описание модели задачи Job Shop (JS), из которого станет ясно, почему данная модель «удобно» подходит в качестве основы для формализации поставленной задачи.

В задаче JS заданное число работ должно быть обработано некоторым количеством процессоров. Все работы и процессоры доступны, начиная с нулевого момента. Каждая работа содержит цепь (цепь – это граф последовательно расположенных узлов) операций, которые должны быть обработаны в заданном порядке. Каждая операция должна быть обработана назначенным ей процессором без прерываний. Время обработки любой операции детерминировано, не зависит от остальных времен обработки и известно заранее. Времена подготовки/завершения обработки, переналадки (если есть) и транспортировки входят во время обработки. Устройства загрузки и выгрузки не ограничены в объеме. Каждый процессор может обработать только одну операцию в момент времени. Любое допустимое расписание определяет время начала каждой операции таким образом, что не образуется временных перекрытий любых двух операций на одном станке и любых двух операций в маршруте обработки. Цель состоит в нахождении допустимого расписания, минимизирующего время окончания всех работ, которое в иностранной литературе называется makespan.



Организационная структура САПЛ-ТП

Однако, как видно из приведенного выше описания типовой задачи JS, она не полностью удовлетворяет указанной постановке задачи, поэтому нашей целью стало расширение классической модели JS для корректного описания многономенклатурной производственной среды механообработки.

Классическая задача JS использует некоторые допущения [5], которые можно классифицировать следующим образом:

Допущения по деталям (партиям деталей)

J1. Каждая деталь начинает обрабатываться в начальный момент расчетного периода. Каждая деталь доступна для обработки в течение всего этого периода.

J2. Существуют ограничения предшествования между любыми двумя операциями одной детали (иначе, у каждой детали есть свой фиксированный маршрут обработки, которому она должна следовать), но не между любыми двумя операциями разных деталей.

J3. Маршрут обработки каждой детали определяется очередностью ее операций и назначенными станками для каждой операции. Маршруты обработки деталей могут не совпадать.

J4. Каждая операция имеет конечное положительное и детерминированное время обработки, которое включает время транспортировки детали и время установки (если таковое имеется).

J5. Для деталей не предусмотрено директивных сроков:

Допущения для станков.

M1. Каждый станок непрерывно доступен в течение всего времени планирования без поломок и техобслуживания.

Допущения, связанные с процессом обработки:

P1. Все детали должны быть обработаны.

P2. Каждый станок обрабатывает не более одной детали (операции) в каждый момент времени.

P3. Каждая операция, однажды начавшись, должна быть закончена без прерываний.

P4. Каждый станок обладает бесконечными буферами загрузки/выгрузки деталей.

P5. Каждая деталь (партия деталей) может обрабатываться только одним станком в каждый момент времени.

P6. Обработка детали должна точно соответствовать заданному маршруту.

P7. Время переключения между обработкой двух операций следующих друг за другом на одном станке равно 0.

Теперь становится очевидным: чтобы расширить классическую модель до модели реальной многономенклатурной производственной системы механообработки, необходимо ослабить допущения J2 (для учета приоритета некоторых партий деталей), J5 (для учета директивных сроков в модели), P5 (для обработки партии деталей группой станков) и P7 (для учета переналадок).

Чтобы знать, как расширить задачу job shop, вначале необходимо привести математическую модель самой задачи job shop [5].

Пусть Ψ есть множество из n деталей, M – множество из m станков, а I – множество из o операций. Деталь $J \in \Psi$ состоит из множества операций, которые необходимо обработать в заданном порядке. По этой причине $J \subseteq I$, а Ψ – это часть I . Для любой детали J , индекс ее операции в порядке обработки деталей определяется как $J_1, \mathbf{K}, J_{|J|}$. Деталь операции $i \in I$ обозначим как J^i . Определим множество пар последовательных (следовательно, упорядоченных) операций детали J как $A_J = \{(i, j) : J^i = J^j = J, i = J_r, j = J_{r+1}, 1 \leq r \leq |J|\}$. Для каждой пары $(i, j) \in A_J$, i – это непосредственная операция-предшественник для операции j одной детали, поэтому обозначим $i = JP(j)$, а j – операция-наследник операции i , и $j = JP(i)$. Обозначим через s и t две фиктивные операции нулевой длительности, где s – начинается до, а t – после всех остальных операций. Каждой операции $i \in I$ назначается определенный станок $m(i) \in M$; время обработки операции i на этом станке $p_i > 0$. Обозначим через I_k множество операций назначенных станку k согласно m , а через B конфликтное множество всех неупорядоченных пар (i, j) операций i и j , обрабатываемых на одном станке, т.е. $B = \{(i, j) : i, j \in I_k, i \neq j, k \in M\}$. Каждая операция обрабатывается только одним станком, на-

значенным ей, а каждый станок может обрабатывать не более одной операции одновременно. Не допускается прерываний ни для одной операции. Все величины времен обработок положительны; остальные величины неотрицательны. Все детали и станки непрерывно доступны, начиная с нулевого момента. Целью является нахождение допустимого расписания, которое соответствует порядку обработки каждой детали и возможности каждого станка, и минимизирует makespan.

Математическая модель формализованной классической задачи job shop представляется моделью Манна, использующей переменную выбора очередности y_{ij} для любых двух операций, обрабатываемых на одном станке, т.е. $i, j \in I, (i, j) \in B$:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i \text{ предшествует } j \\ 0, & \text{если наоборот} \end{cases}$$

Минимизировать x_t при условии (1)

$$x_j - x_i \geq p_i \quad \forall (i, j) \in A, J \in \Psi \quad (2)$$

$$x_j + H(1 - y_{ij}) - x_i \geq p_i \quad \forall (i, j) \in B \quad (3)$$

$$x_j + Hy_{ij} - x_i \geq p_i \quad \forall (i, j) \in B \quad (4)$$

$$x_t - x_i \geq p_i \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in B \quad (6)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$x_t \geq 0 \quad (8)$$

Расширение модели Манна для задачи JS с учетом зависимых от очередности времен переналадок является довольно прямым. Пусть $p_{ij}^s \geq 0$ есть зависящая от очередности время переналадки между операцией i и ее операцией наследником j на том же станке $k = m(i) = m(j), i, j \in I, k \in M$. Пусть p_{si}^s определяет время переналадки операции $i \in I_k$, если i является первой операцией в списке обработки на станке k . Также определим через p_{it}^s время переналадки для операции $i \in I_k$, если i обрабатывается последней в очереди на станок k . Модель для задачи JS с учетом времен переналадок будет отличаться от модели классической JS лишь включением соответствующих времен переналадок в четырех ограничениях (3) – (6) и с сохранением целевой функции и остальных критериев модели JS.

Расширение модели Манна для задачи JS с учетом множества однотипных станков выглядит следующим образом. Пусть M_i есть множество (один или несколько) станков, обрабатывающих операцию $i \in I$. Две операции $i, j \in I$ могут вступить в конфликт, если имеют общий станок $k \in M_i \cap M_j$. Можно расширить модель JS для получения модели задачи реализации ТП со множеством однотипных станков, которая будет учитывать указанную особенность в модели лишь при незначительных изменениях, путем определения конфликтного множества B как: $B = \{(i, j) : i, j \in I, M_i \cap M_j \neq \emptyset\}$.

Учет директивных сроков в классической модели JS осуществляется за счет введения дополнительных ограничений, а именно

$$x_{J|J} + p_{J|J} \leq d_J \quad \forall J \in \Psi, \quad (9)$$

все остальные ограничения при этом сохраняются.

Для того, чтобы учесть приоритетность выполнения деталей, вводится дополнительное множество $P = \{P_1, \mathbf{K}, P_q\}$, где $1 \leq q \leq n$. Каждой детали назначается свой приоритет $n(J) \in P$. Расширение модели для случая учета приоритетности деталей происходит за счет

дополнения неравенств (3) и (4) условиями $n(J^i) = n(J^j)$, и ввода дополнительных ограничений на случай неравенства приоритетов:

$$x_i - x_j \geq p_j \quad \forall (i, j) \in B, n(J^i) > n(J^j) \quad (10)$$

$$x_j - x_i \geq p_i \quad \forall (i, j) \in B, n(J^i) < n(J^j) \quad (11)$$

На основе приведенных выше так называемых «однохарактеристических» расширенных модели JS мы можем составить модель многономенклатурной производственной системы механообработки, которая будет представлена полностью в дальнейших статьях авторов.

Поставленная задача является NP-трудной задачей дискретной оптимизации. В данной работе для её решения используются исключительно методы случайного поиска, дающие близкое к оптимальному решение, поскольку использование точных методов невозможно в данной задаче по многим причинам. Например, даже для решения практической задачи малой размерности $n \times m$ (n – число деталей, m – число станков) точные методы поиска занимают слишком много времени [4].

Одним из методов случайного поиска является *Simulated Annealing* (метод моделируемого «отжига») метод для нахождения псевдооптимальной перестановки. В этом подходе используется аналогия между процессом нахождения псевдооптимального решения и моделью охлаждения термодинамической системы. Проводится аналогия между:

- энергией термодинамической системы (E) и обобщенным критерием оптимальности задачи (F), полагая, что их значения совпадают,
- перестановкой (P), задающей порядок выполнения работ, и состоянием термодинамической системы (p).

Вводятся случайные операторы перехода из одного состояния системы в другое, или, другими словами, от одной перестановки работ к другой. Задается эмпирический параметр T – температура термодинамической системы. Из известной формулы распределения вероятностей энергий для термодинамической системы Больцмана следует, что вероятность перехода системы из состояния с энергией E_1 в состояние с энергией E_2 при температуре T , $P(\Delta E) = e^{-\Delta E/kT}$, где $\Delta E = E_2 - E_1$ и k – постоянная Больцмана (коэффициент пропорциональности, задающий отношение между энергией и температурой). Оптимизационный алгоритм работает следующим образом: для некоторого начального параметра T_0 в состоянии p_0 находится E_0 – значение энергии термодинамической системы. Применяется случайный оператор перехода из состояния p_0 в p_1 . Находится значение E_1 для этого состояния. Если $\Delta E \geq 0$ или $P(\Delta E) < x$, где x – случайное число, равномерно распределенное в диапазоне $[0,1]$, то p_1 принимается за текущее состояние системы и шаг работы алгоритма повторяется. Иначе шаг повторяется при том же самом состоянии системы p_0 . После определенного числа шагов предполагается, что происходит «охлаждение» термодинамической системы $T_{i+1} = T_i / 2$. Условием останова алгоритма является отсутствие улучшений значения критерия задачи.

Одним из самых эффективных методов нахождения быстрого и близкого к оптимальному решения являются *Генетические Алгоритмы* (ГА) – адаптивные методы поиска, которые в последнее время часто используются для решения задач функциональной оптимизации. Они наиболее применимы для практических многомерных задач. ГА основаны на генетических процессах биологических организмов: биологические популяции развиваются в течение нескольких поколений, подчиняясь законам естественного отбора и по принципу «выживает наиболее приспособленный» (survival of the fittest), открытому Чарльзом Дарвином. Подражая этому процессу генетические алгоритмы способны «развивать» решения реальных задач, если те соответствующим образом закодированы.

ГА используют прямую аналогию с таким механизмом. Они работают с совокупностью «особей» – популяцией, каждая из которых представляет возможное решение данной проблемы. Каждая особь оценивается мерой ее «приспособленности» согласно тому, насколько «хорошо» соответствующее ей решение задачи (в природе это эквивалентно оценке того, насколько эффективен организм при конкуренции за ресурсы). Наиболее приспособленные особи получают возможность «воспроизводит» потомство с помощью «перекрестного скрещивания» с другими особями популяции. Это приводит к появлению новых особей, которые сочетают в себе некоторые характеристики, наследуемые ими от родителей. Наименее приспособленные особи с меньшей вероятностью смогут воспроизвести потомков, так что те свойства, которыми они обладали, будут постепенно исчезать из популяции в процессе эволюции.

Так и воспроизводится вся новая популяция допустимых решений, выбирая лучших представителей предыдущего поколения, скрещивая их и получая множество новых особей. Это новое поколение содержит более высокое соотношение характеристик, которыми обладают хорошие члены предыдущего поколения. Таким образом, из поколения в поколение хорошие характеристики распространяются по всей популяции. Скрещивание наиболее приспособленных особей приводит к тому, что исследуются наиболее перспективные участки пространства поиска. В конечном итоге популяция будет сходиться к оптимальному решению задачи.

Поиск с запретами является еще одним стохастическим методом глобального поиска. Он основан на аналогии с человеческим поведением, т.е. на присутствии в поведенческой схеме человека случайных элементов, которые означают, что в одной и той же ситуации человек может поведи себя разным образом. Сохранение листа запретов, в котором, например, может храниться набор уже просмотренных точек пространства поиска, является одной из основных характеристик данного подхода. Алгоритм заключается в выборе случайной точки в пространстве поиска, рассмотрении точек из окрестностей данной точки, и, при достижении определенного критерия, выборе новой точки в другом регионе поиска, который еще не рассматривался.

Все рассмотренные выше методы имеют общие характеристики: они все адаптивные, итеративные, стохастические алгоритмы, на каждом шаге работы все они оценивают значение функции качества и для каждого можно доказать его сходимость к глобальному оптимуму.

Полученные в рамках проведения экспериментальных исследований созданных на данном этапе моделей и алгоритмов в реальных производственных условиях позволили сделать заключение о возможности значительного сокращения времени работы производственных систем за счет рациональной реализации технологических процессов в условиях многономенклатурных производств. Разработанное на их основе программное обеспечение не потребует значительных затрат на ее адаптацию к конкретным производственным условиям и внедрение, а полученный экономический эффект и качество принятых решений по управлению производственными системами на стадии реализации технологических процессов будут превосходить традиционные подходы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brucker P. Scheduling Algorithms / P. Brucker. Fifth edition, Springer. Heidelberg, 2007. 180 s.
2. Бочкарев П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарев // Технология машиностроения. 2002. № 1. С. 10-14.
3. Бочкарев П.Ю. Планирование технологических процессов в условиях многономенклатурных механообрабатывающих систем. Теоретические основы разработки подсистем планирования маршрутов технологических операций: учеб. пособие / П.Ю. Бочкарев, А.Н. Васин. Саратов: СГТУ, 2004. 136 с.
4. Algorithms for the job shop scheduling problem: A comparison of different methods / J. Käschel, T. Teich, G. Köbernik, B. Meier // European Symposium on Intelligent Techniques, Greece, 1999. P. 3-4.

5. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.89.154>

Иванов Александр Александрович – аспирант кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Бочкарев Петр Юрьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Ivanov Aleksandr Aleksandrovich – Post-graduate Student of the Department of «Designing technical and technological complex» of Saratov State Technical University

Bochkarev Petr Yurievich – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of «Designing technical and technological complex» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 11.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК.681.5

В.А. Каракозова, А.А. Игнатьев

**ВЫБОР ПОДАЧИ КРУГА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА
ОБРАБОТКИ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА**

Предлагается методика определения рационального режима по максимуму запаса устойчивости ДС, выбранному из полученных для различных подач на основе идентификации динамической системы шлифовального станка по автокорреляционным функциям виброакустических колебаний.

Шлифование, подача круга, передаточная функция, виброакустические колебания, критерий Михайлова

V.A. Karakozova, A.A. Ignatyev

**CHOICE OF GIVING OF THE CIRCLE FOR QUALITY MAINTENANCE
PROCESSINGS OF RINGS OF BEARINGS ON THE BASIS OF IDENTIFICATION
OF DYNAMIC SYSTEM OF THE GRINDING MACHINE TOOL**

The technique of definition of a rational mode on a maximum of a stock of stability DS chosen of received for various giving on the basis of identification of dynamic system of the grinding machine tool on autocorrelation functions vibrating acoustic oscillation is offered.

Grinding, circle giving, transfer function, vibrating acoustic oscillations, Mihajilov's criterion
Динамические характеристики станков оказывают большое влияние на качество обрабатываемых поверхностей деталей, что отмечалось в ряде известных работ [1-3]. При исследовании динамических характеристик станка важное место отводится определению передаточной функции динамической системы (ДС) [4]. Анализ передаточной функции позволяет установить такие характеристики качества как степень устойчивости и запас устойчивости ДС [4], которые можно использовать для обоснования выбора режима обработки на станке, обеспечивающего высокое качество обработки деталей, например, минимальные значения некруглости, огранки,

волнистости однородности структур поверхностного слоя дорожек качения колец подшипников при шлифовании [5].

Для определения передаточной функции ДС $W(p)$ предложен экспериментально-аналитический метод, сущность которого заключается, во-первых, в определении автокорреляционной функции (АКФ) $K_y(\tau)$ виброакустических колебаний формообразующих узлов станка при обработке при условии, что ДС возбуждается силой резания, имеющей спектр типа «белый шум», во-вторых, в построении аналитической модели АКФ путем аппроксимации экспериментальных данных, в-третьих, в вычислении передаточной функции из следующей формулы:

$$W(p) \cdot W(-p)[X(p) + X(-p)] = K_y(p) + K_y(-p) \quad (1)$$

где $K_y(p)$ – изображение по Лапласу АКФ $K_y(\tau)$, $X(p)$ – изображение входного воздействия.

При реализации метода принято, что процесс шлифования является квазистационарным (переходной процесс заканчивается за 1,0-1,5с), характеристики ДС при обработке одного кольца не изменяются, то есть ДС рассматривается как линейная. Для вычисления АКФ использовался программный продукт Matlab. Типичный вид АКФ ВА колебаний опоры кольца $K(t)$ при шлифовании на станке SIW-5 при различных подачах круга показан на рис. 1. Полученные по результатам измерений ВА колебаний ДС шлифовального станка АКФ с достаточной для практики точностью порядка 10 – 15% могут быть аппроксимированы формулой

$$K(t) = Ae^{-at} (1 + \cos \Omega t) \cos w_0 t, \quad (2)$$

где $A = K(0)$, a – коэффициент затухания экспоненты, Ω – круговая частота низкочастотной составляющей АКФ (огibaющей), w_0 – круговая частота основной составляющей АКФ.

Проверка модели (2) на адекватность проводилась по критерию Фишера.

Численные значения параметров АКФ получаются известными методами, что позволяет в дальнейшем вычислить реальную передаточную функцию замкнутой ДС шлифовального станка при стационарном резании по формуле

$$K(p) + K(-p) = W(p)W(-p), \quad (3)$$

где $K(p)$ – изображение по Лапласу $K(t)$.

Покажем, как аналитически получается выражение для передаточной функции из формулы (2) с учетом формулы (3).

Используя известные тригонометрические преобразования для произведения косинусов, получаем выражение

$$K(t) = A \cdot \left[e^{-at} \cos w_0 \cdot t + \frac{1}{2} e^{-at} \cdot \cos(w_0 + \Omega) \cdot t + \frac{1}{2} \cdot e^{-at} \cos(w_0 - \Omega)t \right]. \quad (4)$$

Применяя преобразование Лапласа [4], получаем

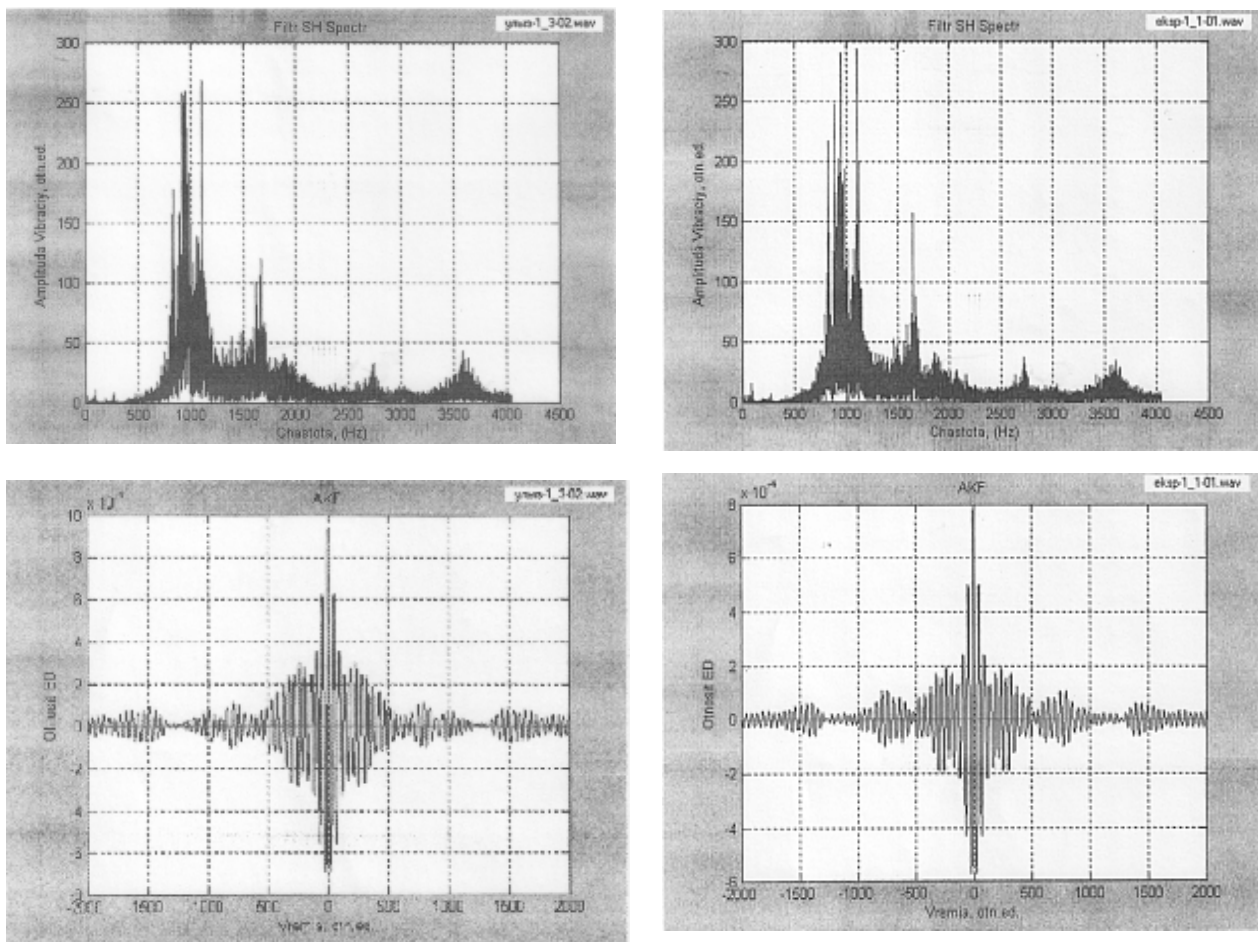
$$K(p) = A \left[\frac{p+a}{(p+a)^2 + w_0^2} + \frac{1}{2} \frac{p+a}{(p+a)^2 + (w_0 + \Omega)^2} + \frac{1}{2} \frac{p+a}{(p+a)^2 + (w_0 - \Omega)^2} \right]. \quad (5)$$

Выполняя алгебраические преобразования с приведением выражения (5) к общему знаменателю, упрощаем числитель выражения за счет пренебрежения величиной Ω по сравнению с w_0 , тогда получаем достаточно простое выражение для $K(p)$

$$K(p) = \frac{2(p+a)[(p+a)^2 + w_0^2]}{[(p+a)^2 + (w_0 + \Omega)^2][(p+a)^2 + (w_0 - \Omega)^2]}. \quad (6)$$

Соответственно, выражение для $K(-p)$ имеет вид

$$K(-p) = \frac{2(-p+a)[(-p+a)^2 + w_0^2]}{[(-p+a)^2 + (w_0 + \Omega)^2][(-p+a)^2 + (w_0 - \Omega)^2]}. \quad (7)$$



Подача 0,3 мм/мин

Подача 0,4 мм/мин

Рис. 1. Типичный вид спектра и автокорреляционной функции виброакустических колебаний динамической системы при различных подачах круга

Произведем сложение выражений (6) и (7), причем упрощаем числитель промежуточного выражения за счет пренебрежения величиной α по сравнению с ω_0 . После алгебраических преобразований с учетом формулы (3) получаем для передаточной функции замкнутой ДС шлифовального станка выражение

$$W_3(p) = A \frac{\sqrt{a} \cdot (p + w_0) \cdot [(p + a)^2 + w_0^2]}{[(p + a)^2 + (w_0 + \Omega_0)^2] [(p + a)^2 + (w_0 - \Omega_0)^2]} \quad (8)$$

или в форме многочлена:

$$W(p) = \frac{B_3 p^3 + B_2 p^2 + B_1 p + B_0}{A_4 p^4 + A_3 p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + A_0} \quad (9)$$

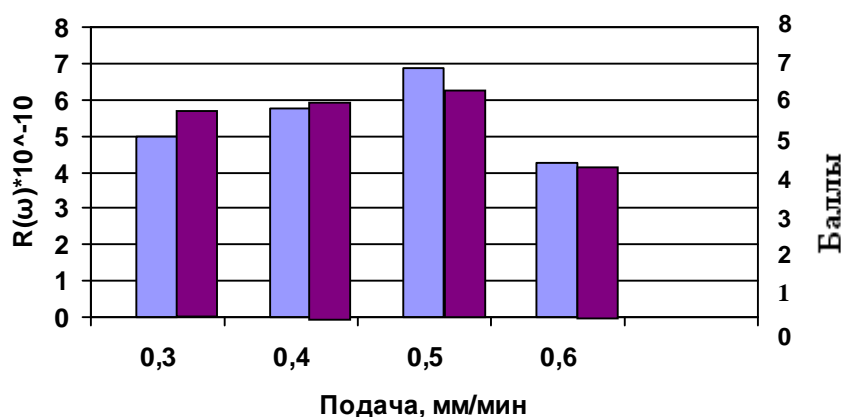
Оценку устойчивости замкнутой ДС целесообразно выполнить по критерию Михайлова [4] на основе вычисления минимального расстояния от кривой Михайлова до начала координат на комплексной плоскости $\{\text{Re}M(j\omega), \text{Im}M(j\omega)\}$, где $M(j\omega)$ – характеристический многочлен передаточной функции $W_3(j\omega)$; $\text{Re}M(j\omega), \text{Im}M(j\omega)$ – действительная и мнимая части $M(j\omega)$

$$M(j\omega) = [(j\omega + a)^2 + (w_0 + \Omega_0)^2] [(j\omega + a)^2 + (w_0 - \Omega_0)^2] \quad (10)$$

Экспериментально установлено, что при изменении подачи круга величины W_0 и Ω меняются незначительно, а основные изменения АКФ связаны с изменением величины a , которое определяет изменение положения годографа Михайлова относительно начала координат, т.е. изменение запаса устойчивости. В среде Mathcad разработана программа для вычисления минимального расстояния от начала координат до годографов Михайлова, то есть запаса устойчивости системы при реализации подач 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 мм/мин.

Измерения вибраций и качества поверхности выполнены на каждой подаче для 3 последовательно обработанных колец и произведено усреднение. Стандартное отклонение (СКО) по качеству колец составляет не более 0,4 балла, т.е. не превышает 8%, а по запасу устойчивости – не более 5%.

Запас устойчивости ДС сопоставлялся с качеством поверхностного слоя шлифованных дорожек качения колец, которые оценивались вихретоковым методом в баллах по специальному классификатору (рис. 2).



■ – качество поверхности в баллах ■ – запас устойчивости в усл.ед.

Рис. 2. Зависимость запаса устойчивости и качества поверхности от подачи круга

Из данных рисунка можно сделать вывод, что при повышении подачи от 0,3 до 0,5 мм/мин запас устойчивости незначительно возрастает. Однако с увеличением подачи до 0,6 мм/мин запас устойчивости снижается и ухудшается качество поверхностного слоя дорожки качения кольца подшипника, что подтверждается данными вихретокового контроля. Это объясняется большой скоростью съема припуска при подаче 0,6 мм/мин. Следовательно, рациональной подачей при предварительном проходе является 0,5 мм/мин, на которой обеспечиваются заданное качество поверхности и наибольшая производительность.

Таким образом, данную методику определения рационального режима по максимуму запаса устойчивости ДС, выбранному из полученных для различных подач, рекомендуется применять при предварительном шлифовании и на черновых проходах, когда подача круга достаточно велика. При этом достигается хорошее качество поверхности качения колец при практически максимальной производительности, что способствует получению их высокого качества после чистовых операций шлифования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
2. Аршанский М.М. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках / М.М. Аршанский, В.П. Щербаков. М.: Машиностроение, 1988. 136 с.

3. Никулин Е.Н. Основы теории автоматического управления Частотные методы анализа и синтеза систем / Е.Н. Никулин. СПб: БХВ-Петербург, 2004. 631 с.

4. Динамический мониторинг технологического оборудования / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, И.Н. Янкин, М.Б. Бровкова. Саратов: СГТУ, 2008. 312 с.

5. Игнатъев А.А. Оценка динамического состояния шлифовального станка по автокорреляционным функциям виброакустических колебаний для оптимизации режимов обработки / А.А. Игнатъев, В.А. Каракозова, С.А. Игнатъев // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2009. Т. 12. N4 (33). С. 91-95.

Каракозова Вера Алексеевна –
заведующая лабораторией кафедры
«Автоматизация и управление
технологическими процессами»
Саратовского государственного
технического университета

Karakozova Vera Alekseevna –
the laboratory chief
chair «Automation and management
of technological processes»
Saratov State Technical University

Игнатъев Александр Анатольевич –
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Автоматизация
и управление технологическими
процессами» Саратовского государственного
технического университета

Ignatyev Alexander Anatolevich –
doctor of technical sciences, professor,
head of Department «Automation
and management of technological processes»
the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.833:621.9.04:004.94

В.Ю. Карачаровский, С.А. Рязанов

ВИЗУАЛИЗАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛИЗОВАННОГО КОНТАКТА В ЧЕРВЯЧНЫХ ПЕРЕДАЧАХ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ 3D КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ

На основе метода твердотельного моделирования процессов формообразования выполнено «виртуальное нарезание» колеса червячной передачи. Рассмотрена технологическая схема обеспечения локализованного контакта в зацеплении, приведен системный блок технологических корректур с конкретными примерами. Предложена схема прогнозирования пятна контакта на основе компьютерного сопоставления поверхностей зубьев червячных колес, нарезанных по номинальным и измененным установкам, методом геометрического анализа их относительных отклонений.

Червячная передача, технология изготовления, твердотельное моделирование, виртуальное нарезание, локализованный контакт, геометро-кинематические характеристики

V. Yu. Karacharovskiy, S. A. Ryazanov

VISUALIZED ESTIMATION OF PARAMETERS OF THE LOCALISED CONTACT IN WORM GEARING ON THE BASIS OF 3D COMPUTER GRAPHICS METHODS APPLICATION

Virtual cutting of a worm gear wheel has been done on the basis of the solid state modeling of the forming processes. The technological scheme of maintenance of the localised contact in gearing has been considered, the system block of technological proof-readings with concrete examples has been resulted. The forecasting scheme of a contact spot on the basis of computer comparison of teeth surfaces of the worm wheels cut on nominal and changed installations is offered by a method of the geometrical analysis of their relative deviations.

Worm gear, manufacturing techniques, solid modeling, virtual cutting, localized contact, characteristic geometrical-cinematic

Червячные передачи склонны к возникновению кромочного контакта в зацеплении вследствие теоретически линейного характера соприкосновения поверхностей зубьев колеса и витков червяка. Определенную нечувствительность этих передач к неизбежным монтажным и технологическим погрешностям обеспечивает локализация контакта в зацеплении.

Геометро-кинематические свойства таких передач характеризуются отклонением передаточного отношения i_{12} и погрешностью перемещений ΔS_j ведомого звена (кривая Бакстера) относительно теоретически точных значений. На рис. 1 приведены указанные показатели для высокоточной червячной передачи с контактом, локализованным по длине и высоте зубьев, рассчитанные аналитическими методами [1].

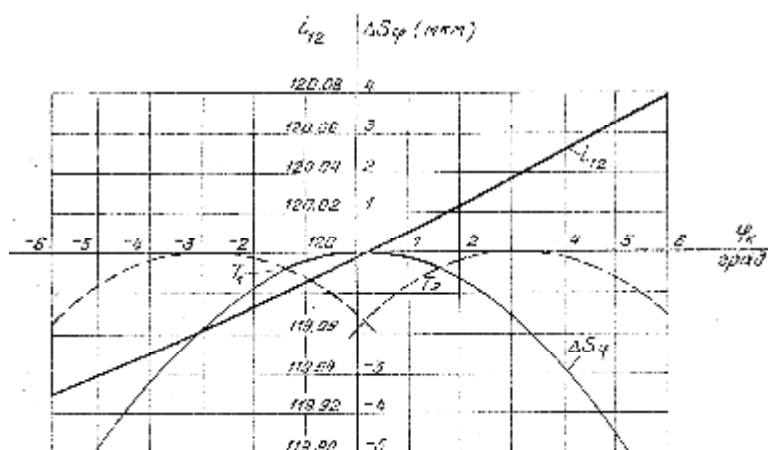


Рис. 1. Характеристики локализованного контакта червячной передачи с параметрами:

$$m = 3.5 \text{ мм}, a_n = 12^0, z_1 = 1, z_2 = 120, d_1 = 55 \text{ мм}, b_2 = 38 \text{ мм}.$$

Создание локализованного контакта обеспечивается технологическими средствами на стадии чистовых операций зубообработки за счет внесения коррективов в точную схему формообразования поверхностей зубьев колеса и витков червяка.

В соответствии с одной из применяемых технологических схем [2] инструмент для обработки поверхностей зубьев колеса изготавливается с диаметром, несколько увеличенным по сравнению с средним (делительным) диаметром исходного червяка. При нарезании инструмент разворачивается (или смещается из средней плоскости колеса [3]) на угол, равный разности углов подъема винтовых линий червяка и инструмента

По указанной схеме методом компьютерного моделирования процесса формообразования [4] выполнено нарезание колеса ортогональной червячной передачи ($m=5$ мм, $z_1=4$, $z_2=45$, $d_1=62.5$ мм, $b_2=48$ мм) по номинальным и измененным наладочным установкам. Наладки рассчитаны из условия обеспечения начальной длины пятна контакта $a_{II} = (0,2...0,3)b_2$.

Увеличение среднего диаметра червячного инструмента составило $\Delta d=2$ мм, угловая установка – $89^{\circ}33'$, межосевое расстояние при нарезании – $a_w=144.75$ мм. Твердотельная модель нарезанного червячного колеса представлена на рис. 2.

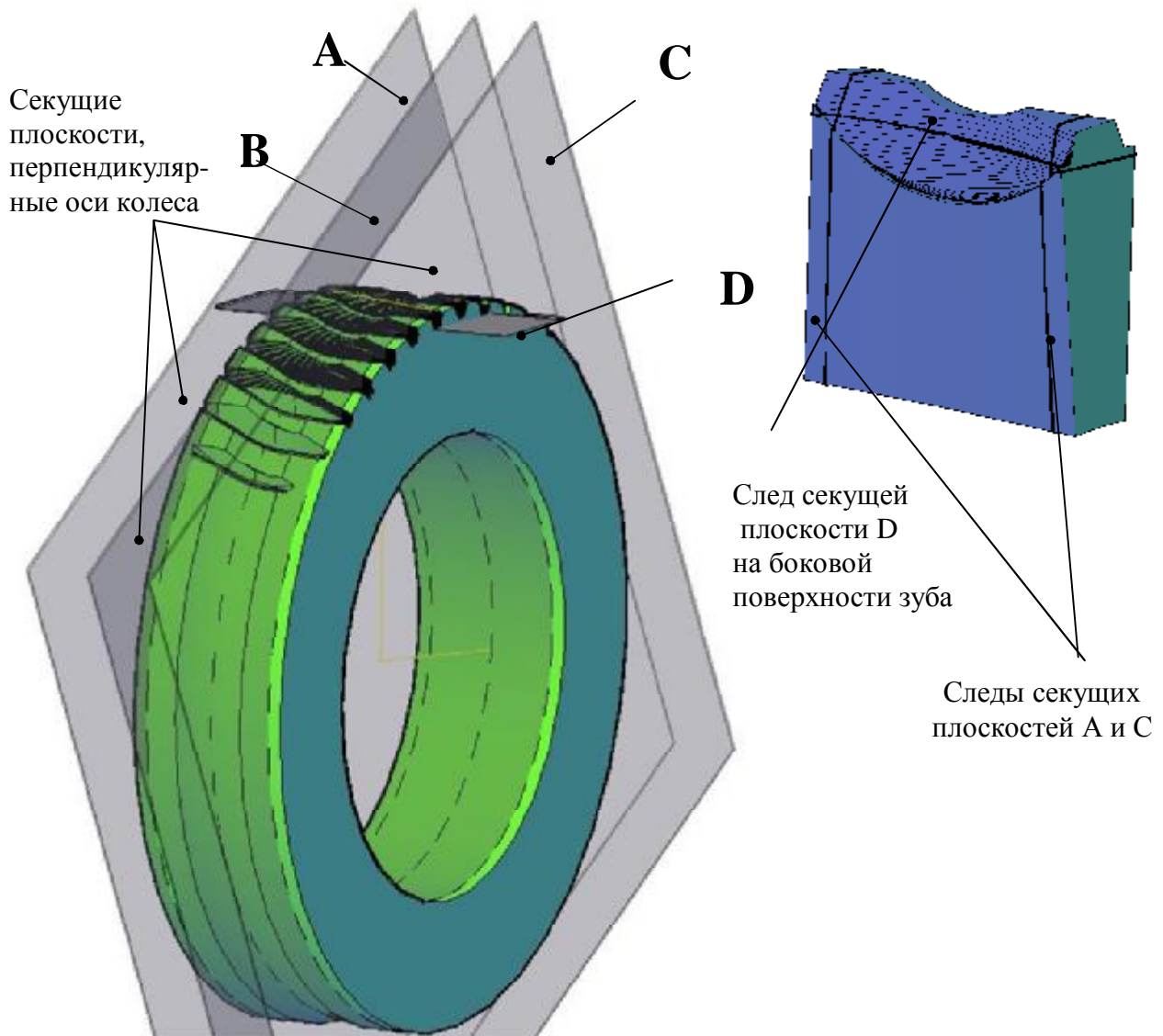


Рис. 2. Твердотельная модель фрагмента зубчатого венца червячного колеса, полученная методом «виртуального нарезания»

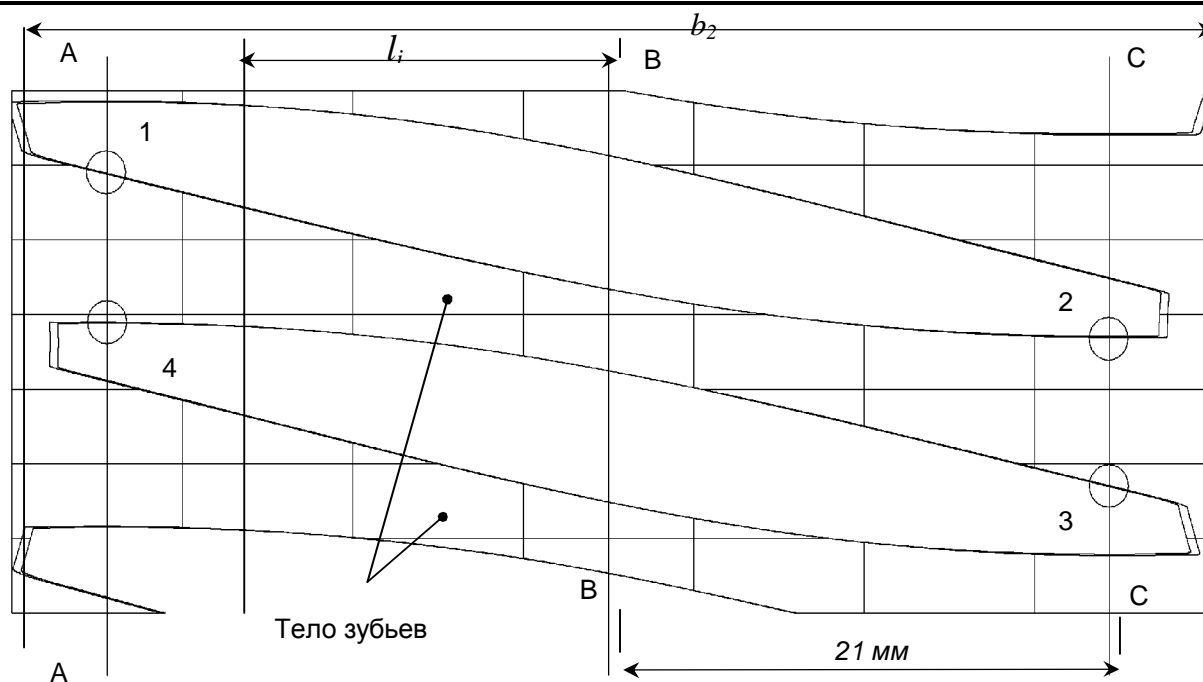


Рис. 3. Сечение боковых поверхностей зубьев плоскостью D

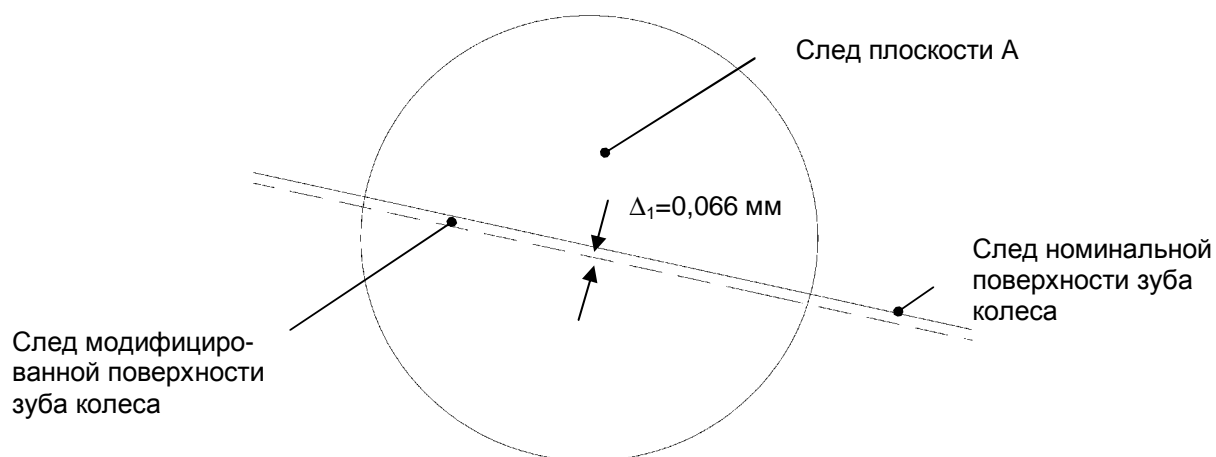


Рис. 4. Расстояние Δ в контрольной точке 1 между совмещенными поверхностями номинального и модифицированного зубьев колес

ЛИТЕРАТУРА

1. Карачаровский В.Ю. Моделирование на ЭВМ зацепления прецизионных червячных передач с локализованным контактом / В.Ю. Карачаровский, К.М. Писманик // Теория и геометрия пространственных зацеплений: тез. докл. III Всесоюз. симпозиума. Курган, 1979. С. 55-56.
2. Wildhaber E. A new look at wormgear hobbing / E.Wildhaber // American Machinist, 1954, June 21, p.149 – 152.
3. А.с. СССР № 633677 Способ изготовления червячной передачи с локализованным пятном контакта / К.М. Писманик, В.Ю. Карачаровский // Опубл. в Б.И. 1978. №43.
4. Карачаровский В.Ю. Геометрическое моделирование формообразования пространственных поверхностей при винтовом относительном движении / В.Ю. Карачаровский, С.А. Рязанов // Проблемы геометрического моделирования в автоматизированном проектировании и производстве: 1-й Междунар. науч. конф. М.: МГИУ, 2008. С. 143-146.

Карачаровский Владимир Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов и детали машин» Саратовского государственного технического университета

Karacharovskiy Vladimir Yuriyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Mechanisms Theory and Parts of Machines» of Saratov State Technical University

Рязанов Сергей Анатольевич – заведующий лабораторией кафедры «Начертательная геометрия и компьютерная графика» Саратовского государственного технического университета

Ryazanov Sergey Anatoliyevich – Laboratory Head of the Department of «Descriptive Geometry and Computer Graphics» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.9.737

Л.Я. Кожуховская, Н.П. Павлова

КРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИННОВАЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Предложена ситуационная модель, в которой использование критериальной базы на всех этапах принятия решений обеспечивает возможность уточнения целей инновационных преобразований технологических систем.

Технологические процессы, инновации, преобразования, ситуационная модель

L.Ya. Kozhuhovskaya, N.P. Pavlova

CRITERION ESTIMATION OF INNOVATIVE TRANSFORMATIONS TECHNOLOGICAL STRUCTURES

The situational model in which use bases at all stages of decision-making provides possibility of specification of the purposes of innovative transformations of technological systems is offered.

Technological processes, innovation, transformation, situational model

Работы в области инновационной деятельности предприятий не в достаточной мере уделяют внимание процессам, посредством которых принимаются организационно-технологические решения, основанные на преобразовании машиностроительных производств. Технологические возможности предприятия являются одним из главных структурных элементов инновационных преобразований и складываются из подмножеств объектов (технологические процессы (ТП), технологические системы (ТС), оборудование и др.), суть которых можно выразить через векторы объемов затрат и выпуска продукции. В реальных условиях предприятие является сложной системой, требующей динамических изменений под влиянием внешних условий и возможностей внутренней среды.

Авторами предложена ситуационная модель принятия решений, отражающая формальное описание внутренних связей в структуре технологического процесса и систем, которая позволяет определить объекты инновационной деятельности, преобразовать и отождествить виды инновационной деятельности с конкретными условиями, выявить потенциальные возможности предприятия в рыночных условиях.

В связи с этим весьма важным, по мнению авторов, является необходимость анализа не только процесса проектирования и реализации ТП и ТС в условиях функционирования предприятия, но и действий, которые необходимо предпринимать для максимизации (минимизации) технико-экономических показателей. Ситуационная модель направлена на оптимизацию действий на всех этапах проектирования и производства в определенных условиях функционирования предприятия. Определив объект, уровень инновационных преобразований ТП и ТС и критерии оценки их эффективности, можно принять решение об объектах и характере преобразований. Инновационные преобразования ТП и ТС технологической системы приводит к необходимости определения точки её равновесного состояния и, как следствие, к целесообразности исследования реакций производственной системы на воздействиях внешней среды и на инновационные преобразования.

Равновесие системы под влиянием этих факторов будет определяться функциональной устойчивостью и гибкостью ее элементов. Рассмотрим две модели поведения:

Модель 1. Предприятие функционирует в жесткой структуре управления (негибкое поведение). При условии, что интенсивность входного и выходного потоков постоянна (например, объем заказа, затраты на материалы, энергоносители и объем продаж не изменяются в течение длительного времени). При этом все другие факторы им жестко подчинены. Однако при изменении любого фактора это приводит к потере устойчивости по другим показателям.

Модель 2. Основана на методологическом принципе «открытых систем», обеспечивающих гибкость принимаемых решений.

Рассматривая состояние производственной системы на определенном зафиксированном промежутке времени, используем в ситуационной модели принцип диспозиции. Для этого делаем ряд допущений о характеристиках и показателях инновационных преобразований ТП и ТС: независимость видов деятельности от других, постоянных коэффициентов затрат и комбинаций затрат и выпуска. Этим допущениям присуща важная черта: у множеств нет размытых границ, то есть при принятии решений исходят из того, что предприятие либо имеет эти производственные возможности, либо нет. Этот подход приемлем для определения «узких мест», требующих инновационных преобразований.

В связи с тем, что в организационно-технологической деятельности участвует большое число звеньев и для принятия решений используются знания из различных сфер деятельности, принятие решения не всегда может достигать оптимума. Это приводит к наличию разрывов в информационных потоках из-за различия используемых критериев оценки принятия решений, требует установления причин разрывов, может привести к множеству производственных возможностей с четкими границами. Методика раскрытия неопределенности, встроенная в структуру модели ситуационного принятия решений об инновационных преобразованиях, является инструментом воздействия, связывающим действия на различных этапах преобразований производственной системы. Большая роль в модели ситуационного управления инновационной деятельностью отводится формированию в модели принятия решений блока критериальной оценки выбора.

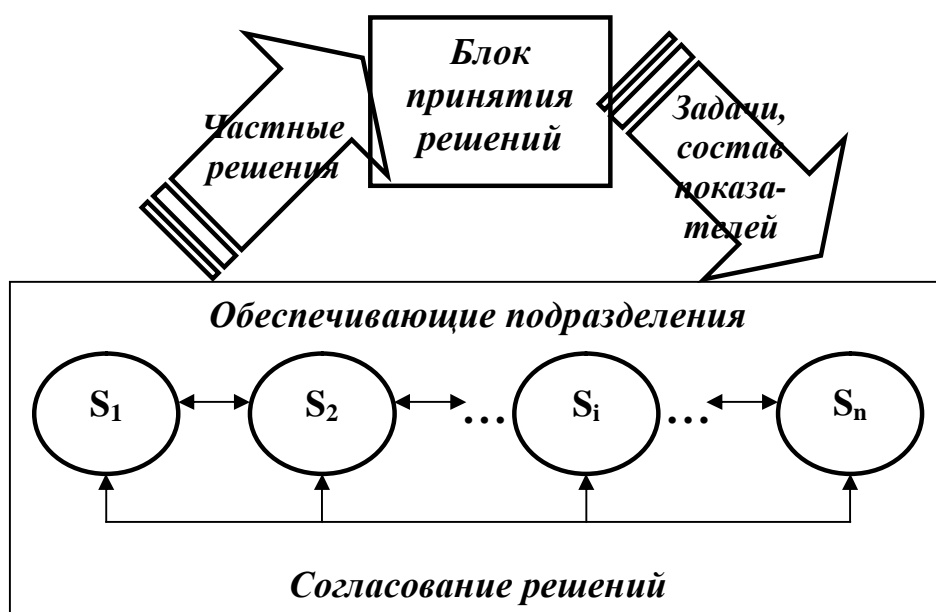
Принятие решений и выбор основаны на следующих этапах и аспектах анализа:

– *на предпроектном этапе:* предварительная разработка плана инновационной деятельности преобразования ТП и ТС, адекватная сложившимся технико-экономическим показателям на предприятии;

– на проектном этапе: формирование плана инновационных преобразований ТП и ТС с учетом изменяющейся ситуации, вызванной особыми проблемами, открытием новых благоприятных возможностей, а также совокупностью этих обстоятельств и порожденных ими факторов.

Принятие решений в сложных системах носит фрагментарный характер по аспектам времени и объектов инновационных преобразований.

Использование единой критериальной базы на всех этапах принятия решений об инновационных преобразованиях обеспечивает возможность уточнения целей преобразования ТП и ТС по результатам анализа производственных возможностей, специфике ситуации, ставящих проблемы общей направленности, сбалансированности частных технико-экономических показателей (рисунок).



Процесс принятия организационно-технологических решений при управлении инновационной деятельностью предприятия

В ситуационной модели процесса формирования и принятия решений позволяет создавать и использовать единое информационное пространство для ЛПП на всех этапах принятия решений, которые имеют последовательно-параллельную схему реализации инновационных процессов, с итерациями, позволяющими с помощью критериев раскрывать неопределенность и корректировать принятие решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожуховская Л.Я. Ситуационное управление процессом формирования и выбора структур технологических процессов / Л.Я. Кожуховская // Известия вузов. М.: Машиностроение, 2003. С. 23-28.

2. Кожуховская Л.Я. Ситуационное управление технологическими структурами на этапах проектирования и производства / Л.Я. Кожуховская. Саратов 2003. 79 с.

Кожуховская Людмила Яковлевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов»

Kozhuhovskaya Ljudmila Jakovlevna – Doctor of Technical Science, Professor Department of «Designing technical and technological complex»

Саратовского государственного технического университета of Saratov State Technical University

Павлова Наталья Павловна –
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Менеджмент» Киргизско-Российского
славянского университета, г. Бишкек

Pavlova Natalya Pavlovna –
Candidate of Technical Sciences, the senior
lecturer of chair Management Kirgizia-Russia
Slavonic University, Bishkek

Статья поступила в редакцию 11.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.923

Д.В. Козлов, А.А. Игнатъев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ПРАВКИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Приводятся результаты экспериментальных исследований с целью определения оптимальной частоты правки шлифовального круга.

Шлифовальный круг, кругломер, профилограф, некруглость, шероховатость, правка шлифовального круга

D.V. Kozlov, A.A. Ignatyev

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WHEEL DRESSING FREQUENCY

The article presents results of experimental investigation to define optimal frequency of wheel dressing.

Grinding wheel, roundness tester, profiloscope, roundness, roughness, wheel dressing

Одним из самых распространенных способов окончательной обработки точных деталей является шлифование. Это, прежде всего, объясняется тем, что абразивным инструментом можно не только обеспечить наивысшую точность и минимальную шероховатость поверхности весьма широкой номенклатуры деталей машин, но и успешно обрабатывать легированные и закаленные стали, твердые сплавы и другие труднообрабатываемые материалы. Существуют следующие основные технические причины, которые влияют на точность изготовления при шлифовании: режимы обработки, состояние оборудования и его точность, состояние технологической оснастки, свойства обрабатываемого металла и величина припуска, упругие деформации технологической системы (ТС), температурные воздействия [1].

Особенность процесса шлифования заключается в том, что шлифовальный круг может самозатачиваться при частичном разрушении или полном выкрашивании затупившихся абразивных зерен, соединенных связкой. В случае большой нагрузки на зерна и применения мягких кругов процесс обычно протекает с интенсивным самозатачиванием рабочей поверхности круга. На окончательных операциях, когда нагрузка на зерно вследствие небольшой глубины шлифования оказывается меньше, происходит постепенное затупление абразивных зерен на рабочей поверхности круга. При интенсивном самозатачивании из-за неравномерной нагрузки на зерна и неравномерного износа круг приобретает неправильную геометрию

ческую форму. Это приводит к ухудшению качества обрабатываемой поверхности и появлению вибраций и огранки. По мере затупления круга увеличивается радиус округления режущих граней абразивных зерен, на которые налипают частицы шлифуемого материала. При этом поры круга заполняются мельчайшими частицами металла и связки. При шлифовании затупленными кругами возрастает давление на деталь в зоне резания, появляются шлифовочные прижоги и огранка [2].

Таким образом, как всякий режущий инструмент, шлифовальные круги в процессе шлифования затупляются и теряют форму. Для восстановления режущей способности кругов и придания им правильной геометрической формы, размеров и профиля периодически в процессе работы производится их правка.

Практический опыт и разносторонние исследования показывают, что от правильного выбора средств и режимов правки зависят не только точность и шероховатость обрабатываемой поверхности, производительность операций, но и расход шлифовальных кругов, износостойкость инструментов до правки и себестоимость шлифования. Массовое и серийное производство предъявляет высокие требования к правке шлифовальных кругов с точки зрения повышения как качества шлифования, так и производительности правки.



Рис. 1. Кругломер Talyrond 131

С целью исследования частоты правки шлифовального круга был проведен эксперимент в реальном производстве. До проведения эксперимента правка круга осуществлялась с периодичностью 35 деталей. Объектом исследования являлись валы с типоразмерами: длина 135 мм, внешний диаметр 14,5 мм. Эксперимент был проведен на круглошлифовальном станке Weiss WKG-05, был использован шлифовальный круг ПП600x50x305 99SA 120K 9V. Для измерений валов по некруглости был задействован кругломер Talyrond 131 (рис.1), способный измерять с точностью 0,03 мкм. Для измерения шероховатости был использован профилограф Homel tester T1000.

Для измерения параметров некруглости изначально были взяты соответственно обработанные валы №1, №17, №35. Результаты измерений этих валов представлены в табл. 1.

Результаты измерения вала №35, а именно круглограмма и профилограмма представлены на рис. 2 и 3, соответственно.

Результаты измерений обработанных валов

Номер обработанного вала	Допуск по некруглости, мкм	Фактический результат по некруглости, мкм	Допуск по шероховатости, Rz, мкм	Фактический результат по шероховатости Rz, мкм
1	5	1,07	4,5	1,53
17	5	1,21	4,5	1,72
35	5	1,15	4,5	1,85

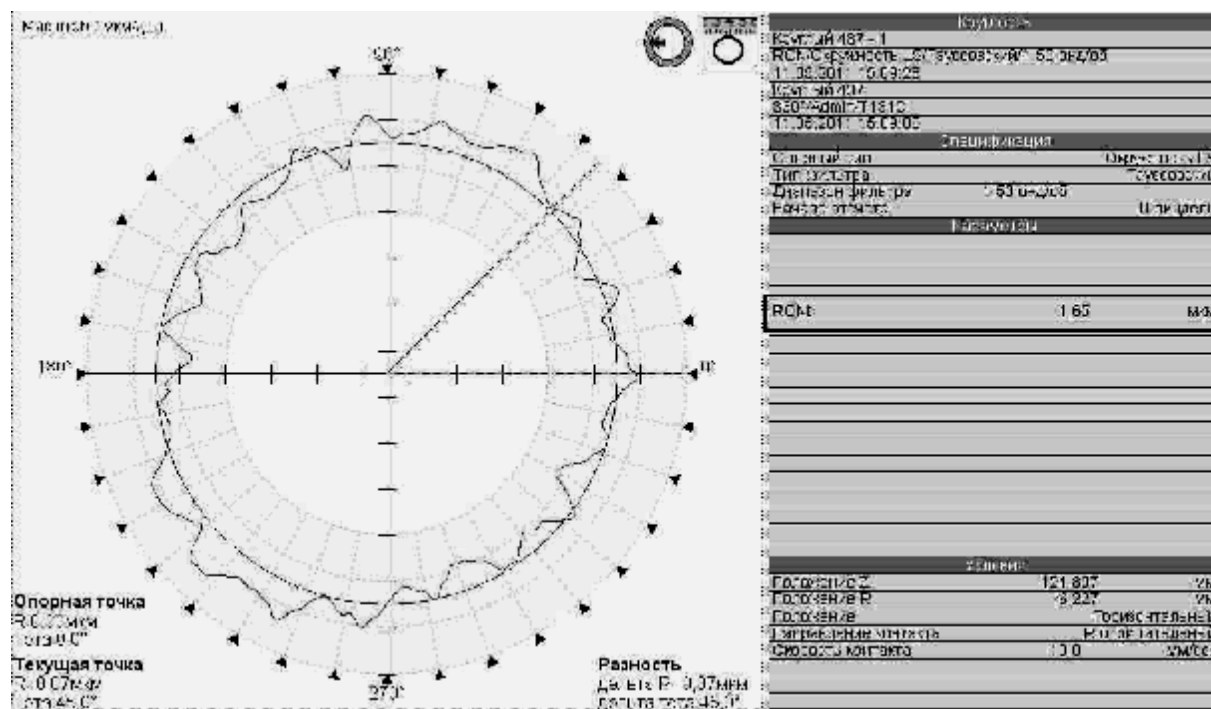


Рис. 2. Круглограмма вала № 35

При допуске по некруглости 5 мкм и по шероховатости Rz 4,5 мкм, сравнивая полученные результаты измерений, делаем вывод, что осуществлять правку шлифовального круга с периодичностью в тридцать пять деталей нецелесообразно.

Соответственно, с целью выявления оптимальной частоты правки данного шлифовального круга далее были обработаны и измерены валы, результаты измерений представлены в табл. 2.

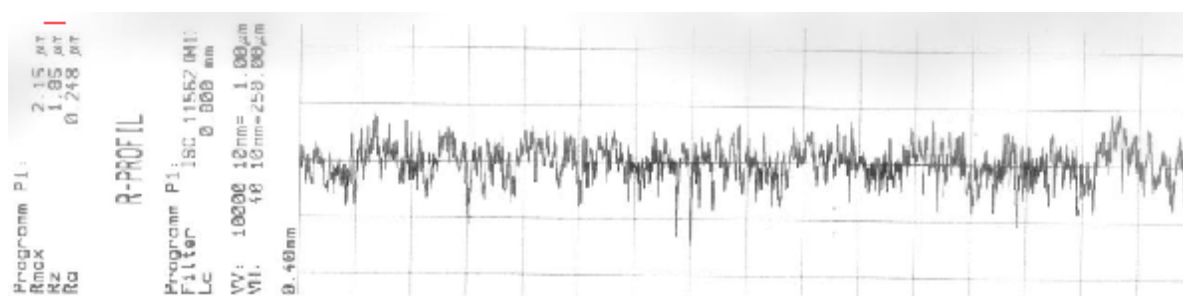


Рис. 3. Профилограмма вала № 35

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Д.В. Экспериментальное исследование влияния режимов шлифования на качество обработанных поверхностей на круглошлифовальном станке Weiss WKG-05 / Д.В.Козлов // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2011. С. 126-133.

2. Кулаков Ю.М. Предотвращение дефектов при шлифовании / Ю.М.Кулаков, В.А.Хрульков, И.В. Дунин-Барковский. М.: Машиностроение, 1975. 144 с.

Козлов Дмитрий Викторович – аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Kozlov Dmitry Viktorovich – Post-graduate Student of the Department of «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Игнатъев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Ignatyev Aleksandr Anatoljevich – Doctor of technical sciences, professor, head of Department «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.923

А.В. Королев

ИССЛЕДОВАНИЕ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЮ И СТАТИЧЕСКОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ УПОРНОГО ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния геометрических параметров упорного подшипника качения на момент сопротивления качению и статическую грузоподъемность. Установлены рациональные геометрические параметры подшипника.

Подшипник, геометрические параметры, момент сопротивления, статическая грузоподъемность, эксперимент

A.V. Korolev

INVESTIGATION OF THE MOMENT AND STATIC RESISTANCE TO THE ROTATION DUTY THRUST BEARING ROLLING

The results of experimental studies on the effect of geometrical parameters of rolling element thrust bearing at the time of the rolling resistance and the static load capacity. Rational geometric parameters are set by the bearing.

Bearing, geometric parameters, moment of resistance, static lifting, experiment

Известно, что момент сопротивления вращению и статическая грузоподъемность относятся к числу важных характеристик работоспособности упорных подшипников. Однако в технической литературе недостаточно сведений, необходимых для расчета рациональных геометрических параметров подшипника, обеспечивающих эти показатели. С целью разработки методики расчета геометрических параметров упорных подшипников были проведены специальные экспериментальные исследования.

В качестве объекта исследований использовались подшипники 1118-2902840-01. Подшипник предназначен для восприятия радиальных и осевых нагрузок в верхней опоре стойки передней подвески автомобилей семейства ВАЗ-1118 (Калина) и ВАЗ 2170 (Приора).

С целью проведения экспериментальных исследований на базе вертикально-сверлильного станка 2Н125 была создана экспериментальная установка для измерения момента сопротивления вращению, а на базе модернизации гидравлического пресса, установленного в лаборатории ОНИЛ ТАПС, производилось измерение статической грузоподъемности.

В процессе измерения момента сопротивления вращению испытуемый подшипник нагружается осевой силой P , которая передавалась от шпинделя радиально-сверлильного станка от рукоятки подачи, на которую навешивается груз определенной величины. Тарировка воздействия осевой силы на подшипник производилась с помощью динамометра типа ДОРМ-0,3. Для повышения стабильности результатов измерения подшипнику перед началом измерения придавали вращение в течение 5-6 оборотов. Измерение момента сопротивления вращению подшипника производится вручную моментомером DB6N4 TONICHI производства Японии.

Методика измерения статической грузоподъемности заключалась в следующем. На станину пресса устанавливался динамометр типа ДПУ-50 и с помощью регулирования давления в цилиндре пресса на штоке цилиндра устанавливалась нагрузка, равная минимальной расчетной статической грузоподъемности. При неизменном давлении в цилиндре шток подвигался к динамометру 3 раза и по трем показаниям определялось среднее значение и максимальная разница в показаниях динамометра. Как было установлено, максимальная разница в показаниях значения силы воздействия штока на динамометр при неизменном давлении в цилиндре не превышало 2%.

После этого все испытываемые подшипники, ранее подвергшиеся измерению момента сопротивления вращению, подвергались воздействию установленной нагрузки. После этого подшипники разбирались и у них осматривались дорожки качения. Те подшипники, которые на дорожках качения имели следы пластической деформации от шариков, в дальнейших измерениях не участвовали. В качестве примера на рис. 5 приведены фотографии колец подшипника со следами пластической деформации от воздействия нагрузки. Затем вновь на станину пресса устанавливался динамометр и регулировалось давление в цилиндре пресса так, чтобы нагрузка на штоке увеличилась на 1000 Н. Вновь оставшиеся подшипники подвергались воздействию новой установленной нагрузки и вновь отсеивались те подшипники, на дорожках которых оставались следы пластической деформации. Так повторялось до тех пор, когда на последнем из испытываемых подшипников появились следы пластической деформации.

За величину статической грузоподъемности принималась нагрузка, которая предшествовала появлению следа пластической деформации.

Регулируемыми количественными факторами являлись радиус профиля дорожки качения r_g , диаметр шариков d_s , волнистость дорожек качения W и внешняя нагрузка P .

Поскольку число количественных факторов в нашем случае равно четырем, то выбираем план полного факторного эксперимента – 2^4 . Эти факторы и область их определения приведены в таблице.

Для проверки гипотезы однородности дисперсии использовался критерий Кохрена с уровнем значимости 0,05, значимость коэффициентов регрессии оценивалась по t_f – крите-

рию Стьюдента с уровнем значимости 0,05, оценка адекватности модели определялась по критерию Фишера с уровнем значимости 0,05.

Показателями исследуемых подшипников (параметрами оптимизации) являлись:

(Y_1) M_t – момент сопротивления вращению ($H \cdot м$);

(Y_3) C_c – статическая грузоподъемность подшипника, H .

В результате обработки экспериментальных исследований были получены математические модели, устанавливающие связи момента сопротивления качению подшипника и его статической грузоподъемности с основными влияющими факторами: диаметром шариков, соотношением радиуса профиля желоба подшипника и диаметра шариков, волнистости дорожки качения и осевой нагрузки на подшипник. Математические зависимости имеют следующий вид:

$$M_t = 0,445 + 8,71 \cdot 10^{-4} \cdot P - 0,212 \cdot d_s + 1,19 \cdot \Delta + 4,58 \cdot W - 1,37 \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot \Delta ; \quad (1)$$

$$C_c = 107,2 + 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot P + 9,6 \cdot d_s - 239,6 \cdot \Delta - 241,3 \cdot W , \quad (2)$$

где M_t – момент сопротивления качению, $H \cdot м$; C_c – статическая грузоподъемность подшипника, $H \cdot 10^3$; d_s – диаметр шариков, мм; Δ – отношение радиуса дорожки качения r_g к диаметру шариков: $\Delta = r_g / d_s$; W – волнистость дорожки качения, мм; P – осевая нагрузка на подшипник в процессе измерения сопротивления вращению, H .

Варьируемые факторы и области их определения

№ п/п	Обозначение фактора	Наименование фактора, размерность	Натуральные границы области определения	
			нижняя	верхняя
1	$X_1(P)$	Статическая нагрузка, Н	3000	6500
2	$X_2(\Delta)$	Отношение $\Delta = r_g / d_s$	0,515	0,566
3	$X_3(d_s)$	Диаметр шариков, мм	5	5,5
4	$X_4(W)$	Волнистость W , мм	0,005	0,020

Как видно из равенства (1), диаметр шариков d_s и волнистость W дорожки качения оказывают на момент сопротивления вращению M_t непосредственное влияние. Осевая нагрузка на подшипник P и соотношение радиуса профиля дорожки качения и диаметра шариков Δ оказывают на момент сопротивления вращению взаимное влияние. Это означает, что с возрастанием нагрузки P на подшипник влияние соотношения радиуса дорожки качения и диаметра шариков Δ на момент сопротивления вращению падает, и при возрастании соотношения радиуса дорожки качения к диаметру шариков Δ влияние осевой нагрузки P на момент сопротивления вращению уменьшается. На статическую грузоподъемность все факторы оказывают непосредственное влияние (2).

На рис. 1-4 показано влияние на момент сопротивления вращению всех исследуемых факторов. На каждом рисунке представлено влияние одного из факторов при верхнем, нижнем и промежуточных значениях других факторов. В подрисуночной подписи указаны размерности величин.

Как видно, одно из значительных влияний на момент сопротивления вращению подшипника оказывает внешняя нагрузка на подшипник P . Момент сопротивления вращению находится в прямой зависимости от нагрузки. Так, с возрастанием нагрузки с 3000 до 6500 Н (в 2,17 раза) момент сопротивления вращению увеличивается при минимальном значении

прочих факторов с 0,5 до 1,1 Н · м (в 2,2 раза), при максимальных значениях прочих факторов – с 0,33 до 0,66 Н · м (в 2 раза). Объясняется это тем, что с увеличением нагрузки возрастают размеры площадки контакта и возрастает сила трения шариков и дорожек качения.

Но наиболее значимым фактором является соотношение радиуса тел качения и дорожек качения. Из рис. 2 видно, что увеличение отношения радиуса дорожки качения к диаметру шариков приводит к уменьшению момента сопротивления качению. Так, возрастание величины Δ с 0,515 до 0,566 (на 10%) приводит к уменьшению момента сопротивления качению при максимальных значениях прочих факторов с 1,06 до 0,67 Н · м (на 58%). При минимальных значениях прочих факторов такое же увеличение значения Δ вызывает уменьшение момента сопротивления вращению с 0,52 до 0,37 Н · м (на 40%). Такое значительное влияние соотношения радиусов тел и дорожек качения на момент сопротивления вращению объясняется тем, что при близких значениях радиусов тел и дорожек качения резко возрастает размер площадки контакта в поперечном направлении и за счет кривизны контактирующих поверхностей резко повышается момент трения между телами и дорожками качения.

При повышении радиуса дорожки качения по отношению к телам качения размер площадки контакта между ними уменьшается, что приводит к значительному снижению момента трения между шариками и дорожками качения.

Размер шариков в подшипнике оказывает менее значительное влияние на момент сопротивления вращению, чем два других рассмотренных фактора. Из рис. 3 видно, что с возрастанием размеров шариков момент сопротивления вращению уменьшается. Например, при минимальных значениях прочих факторов увеличение диаметра шариков с 5 до 5,5 мм (на 10%) момент сопротивления вращению уменьшается с 0,51 до 41 Н · м (на 24%). При максимальных значениях прочих факторов это уменьшение составляет 15% – с 0,77 до 0,67 Н · м. Влияние размера тел качения на момент сопротивления вращению объясняется тем, что с возрастанием размеров тел качения уменьшается число шариков в подшипнике и увеличивается плечо – диаметр шарика, на котором действуют силы трения в подшипнике. Эти факторы оказывают положительное влияние на момент сопротивления. С другой стороны, с возрастанием размеров тел и дорожек качения возрастает размер площадки контакта. Это отрицательный фактор. Но действие положительных факторов более значительно, чем отрицательных, и поэтому в целом увеличение размеров тел качения приводит к снижению момента сопротивления.

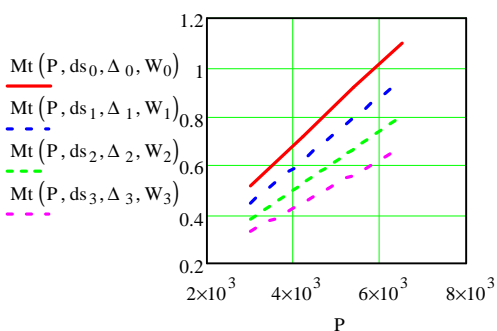


Рис. 1. Зависимость момента сопротивления вращению M_t от осевой нагрузки на подшипник P

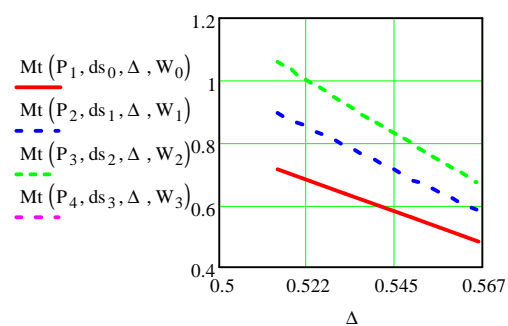


Рис. 2. Зависимость момента сопротивления вращению от соотношения радиуса дорожки качения и диаметра шариков Δ

Наименее значительным фактором из числа исследуемых является волнистость дорожек качения. Из рис. 4 видно, что с возрастанием волнистости дорожки качения в пределах от 0,005 до 0,02 мм (в 4 раза) момент сопротивления вращению возрастает на 11-12%. Наличие волнистости на дорожках и телах качения приводит к неравномерной нагрузке на тела

качения. Те тела качения, которые находятся на вершинах неровностей, нагружены более значительно, чем те, которые находятся во впадинах. Поэтому, с одной стороны, с возрастанием волнистости уменьшается число тел качения, находящихся в полном контакте. С другой стороны, повышенная нагрузка на тела качения способствует увеличению размеров площадок контакта, что приводит к повышению трения между телами и дорожками качения. Влияние последнего из указанных факторов преобладает.

Но особенно значительное влияние волнистость оказывает на колебание силы трения. В ходе экспериментов замечено, что при повышенной волнистости колебание момента сопротивления вращению значительно возрастает. Это может привести к вибрации подшипника в процессе эксплуатации и преждевременному выходу его из строя. С целью определения допустимых пределов изменения волнистости следует продолжить исследования в направлении изучения влияния наиболее значимых факторов на ресурс работы подшипника.

Таким образом, наиболее значительное влияние на момент сопротивления вращению оказывают соотношение радиусов тел и дорожек качения и внешняя нагрузка. Менее значительно влияет размер тел качения. Наиболее слабое влияние на момент сопротивления вращению оказывает волнистость дорожек качения при ее изменении в тех пределах, в которых производилось исследование.

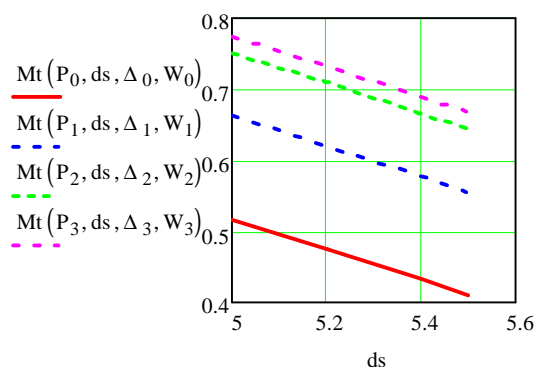


Рис. 3. Влияние диаметра шариков d_s (мм) на момент сопротивления вращению Mt (Н·м) подшипника

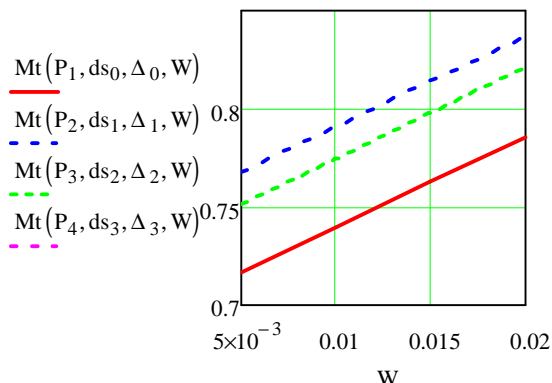


Рис. 4. Зависимость момента сопротивления вращению Mt (Н·м) от волнистости дорожки качения W (мм)

Важно сопоставить момент сопротивления вращению в данном подшипнике с общепринятыми нормами момента сопротивления. Известно, что трение в подшипниках качения представляет собой сложный физический процесс, обусловленный множеством влияющих факторов. К числу этих факторов относятся дифференциальное проскальзывание рабочих поверхностей на площадках контакта, гироскопическое верчение шариков в шариковых подшипниках, потери на упругий гистерезис в материалах контактирующих тел, адгезионное взаимодействие поверхностей дорожек и тел качения, сопротивление смазки, трение тел качения в сепараторе и др. Поэтому общий момент трения может быть с достаточной точностью установлен только экспериментальным способом путем приложения начального сдвигающего момента (статический момент трения) или в условиях вращения подшипника (динамический момент трения).

Практический интерес представляет сравнительная оценка результатов измерения сопротивления вращению испытываемых подшипников и среднестатистического значения момента сопротивления качению. Общестатистическое значению сопротивления качению подсчитывается с помощью приведенного коэффициента трения:

$$M_t = f_{прив} \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot \frac{d}{2},$$

где P – внешняя нагрузка, Н; d – диаметр отверстия подшипника, мм; $f_{прив}$ – приведенный коэффициент трения.

Указанная формула верна для лабораторных условий измерения момента сопротивления подшипников качения, кольца и тела качения которых изготовлены из подшипниковой стали. Она не учитывает действие ряда факторов, например, таких как технологические и монтажные погрешности. Для практических расчетов найденное по формуле значение следует увеличить в 1,5-2 раза.

По данным доктора Арвида Пальмгрена (СКФ), значения приведенного коэффициента трения равны:

1. Радиальные шариковые подшипники – 0,0018.
2. Сферические шарикоподшипники – 0,0010.
3. Упорные шарикоподшипники – 0,0013.
4. Роликовые подшипники – 0,0011.
5. Игольчатые подшипники – 0,0045.

Если воспользоваться этими данными, то в стандартном упорном подшипнике с отверстием 60 мм, как в нашем случае, момент сопротивлению вращению при нагрузке $P=4000$ Н будет равен

$$M_t = (1,5 - 2) \cdot 0,0013 \cdot 10^{-3} \cdot 4000 \cdot \frac{60}{2} = 0,2 - 0,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Полученное значение близко к результатам, полученным в процессе экспериментальных исследований. Следовательно, несмотря на то, что кожух используемого в опорах подшипника не является металлическим, а выполнен из пластмассы, все же при тщательном изготовлении подшипника можно получить значения момента сопротивления вращения подшипника, близкие к моменту трения в обычных металлических упорных подшипниках.

Выше была приведена зависимость статической грузоподъемности подшипников от влияющих факторов (2). По результатам исследования построены зависимости статической грузоподъемности от основных влияющих факторов, в том числе от размера тел качения, соотношения радиусов тел и дорожек качения, волнистости поверхности дорожек качения и от нагрузки, при которой осуществлялось измерение момента сопротивления вращения. Полученные зависимости приведены на рис. 5-8.

Как видно из представленных графиков, наибольшее влияние на статическую грузоподъемность оказывает соотношение радиусов кривизны тел и дорожек качения (рис. 5). С увеличением отношения радиуса дорожки качения к диаметру шариков статическая грузоподъемность, как и следовало ожидать, падает очень значительно. Так, при изменении величины Δ с 0,515 до 0,566 (на 10%) статическая грузоподъемность уменьшается с 35000-38000 до 23000-27000 Н, т.е. на 40-50%. Объясняется это тем, что, как отмечалось выше, с возрастанием значений Δ уменьшаются размеры площадок контакта и площадь контакта шариков и дорожек качения. Это приводит к возрастанию контактных напряжений и, как следствие, к снижению статической грузоподъемности подшипника.

Следовательно, соотношение размеров тел и дорожек качения оказывает на работоспособность подшипника противоречивое влияние.

С одной стороны, с возрастанием Δ уменьшается момент сопротивления качению. С другой стороны, возрастание величины Δ приводит к снижению статической грузоподъемности подшипника. По всей вероятности, следует стремиться к минимуму момента сопротивления вращению путем ограничения нижней границы статической грузоподъемности.

На рис. 6 приведена зависимость статической грузоподъемности от диаметра тел качения. Как видно, с возрастанием размеров тел качения статическая грузоподъемность подшипника возрастает, причем увеличение размеров тел качения на 10% приводит к возрастанию стати-

ческой грузоподъемности на 11-20%. Так как с увеличением размеров тел качения уменьшается и момент сопротивления качению, в упорно-радиальных подшипниках следует стремиться использовать тела качения из конструктивных соображений максимально допустимых размеров.

С возрастанием волнистости дорожек качения колец подшипников статическая грузоподъемность подшипника уменьшается. С возрастанием волнистости в 4 раза статическая грузоподъемность подшипника уменьшается на 12-14%. Возможно, при более значительном повышении волнистости ее влияние на статическую грузоподъемность будет более существенным. Во всяком случае, величину волнистости дорожек качения следует ограничивать, так как с ее возрастанием не только снижается статическая грузоподъемность, но, как было показано выше, возрастает момент сопротивления вращению.

Несколько неожиданным оказалось влияние на момент сопротивления вращению подшипника нагрузки, при которой измерялся момент сопротивления вращению. Как видно из рис. 8, с возрастанием указанной нагрузки статическая грузоподъемность подшипника возрастает. Увеличение нагрузки в 2 раза приводит к возрастанию статической грузоподъемности до 20%. Объясняется это тем, что перед измерением момента сопротивления вращению подшипнику под заданной нагрузкой давали несколько оборотов. По всей вероятности, в процессе измерения момента сопротивления вращению осуществлялась приработка поверхностей тел и дорожек качения. Уменьшались отдельные микронеровности, снижалась волнистость. Это могло способствовать повышению статической грузоподъемности.

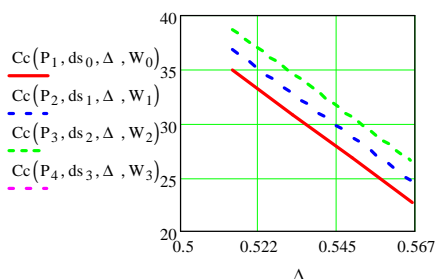


Рис. 5. Зависимость статической грузоподъемности C_c от отношения радиуса профиля дорожек и тел качения Δ

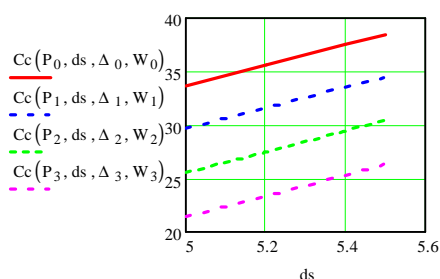


Рис. 6. Влияние на статическую грузоподъемность подшипника C_c размера тел качения d_s

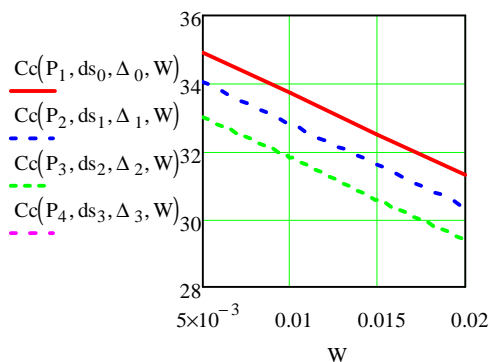


Рис. 7. Зависимость статической грузоподъемности C_c от отношения радиуса профиля дорожек и тел качения Δ

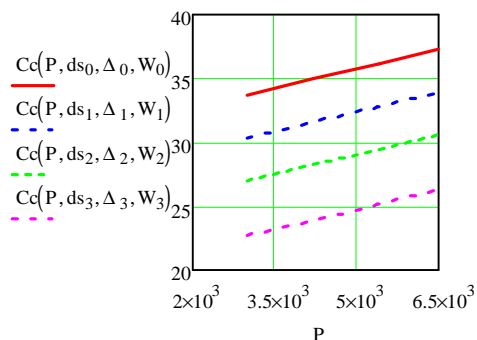


Рис. 8. Влияние на статическую грузоподъемность подшипника C_c размера тел качения d_s

Заключение

1. С целью дальнейшего совершенствования конструкции упорно-радиальных подшипников 1118-2902840 выполнены экспериментальные исследования зависимости момента сопротивления вращению и статической грузоподъемности подшипников от основных влияющих факторов: внешней нагрузки, диаметра шариков, соотношения радиусов кривизны дорожек и тел качения и волнистости дорожек качения. Выбор этих показателей работы подшипников позволяют определить рациональные конструктивные параметры подшипника, так как большинство из них оказывают на данные показатели противоположное влияние.

2. Спроектированы и изготовлены специальные экспериментальные установки для измерения момента сопротивления вращению подшипника и его статической грузоподъемности. Установка для измерения момента сопротивления вращению изготовлена на базе радиально-сверлильного станка, установка для измерения статической грузоподъемности выполнена путем модернизации гидравлического пресса.

3. Разработана методика полного факторного эксперимента 2^4 , позволяющего провести исследования на двух уровнях каждого из исследуемых факторов и тем самым снизить трудоемкость исследований, а также выявить не только прямое влияние каждого из исследуемых факторов, но и их взаимовлияние на показатели подшипника.

4. Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований обеспечила возможность выявить математические зависимости, связывающие момент сопротивления вращению и статическую грузоподъемность подшипника с исследуемыми факторами, и тем самым производить расчеты рациональных геометрических параметров подшипников и осуществлять прогнозирование работы подшипника. Математические модели адекватны опытам с вероятностью более 95%.

5. Установлено, что наибольшее влияние на момент сопротивления вращению и статическую грузоподъемность подшипника оказывает отношение радиусов профилей дорожек и тел качения. С возрастанием этого отношения момент сопротивления качению уменьшается, но снижается статическая грузоподъемность подшипника. Значение этого соотношения также ограничивается тем, что с его возрастанием, как известно, увеличивается радиальный зазор в подшипнике, что может в процессе эксплуатации привести к повышенной вибрации подшипника.

6. Показано, что с возрастанием диаметров шариков в подшипнике уменьшается момент сопротивления вращению подшипника и возрастает его статическая грузоподъемность. Следовательно, диаметры шариков в подшипнике следует выбирать из конструктивных соображений максимально возможных размеров.

7. Установлено, что внешняя нагрузка на подшипник, которая использовалась при измерении его момента сопротивления вращению, оказывает влияние и на его статическую грузоподъемность. Из этого можно сделать вывод, что для повышения статической, а возможно, и динамической грузоподъемности подшипника является рациональным осуществлять его небольшую обкатку в собранном виде под рабочей нагрузкой.

8. С возрастанием волнистости дорожек качения момент сопротивления вращению подшипника увеличивается, а статическая грузоподъемность уменьшается. Но, как было замечено, волнистость дорожек качения существенное влияние оказывает на колебание момента сопротивления в процессе измерения, что может вызывать вибрацию подшипников в процессе ресурсных испытаний и в процессе эксплуатации. Поэтому она, по возможности, должна иметь минимальное значение.

9. На основе выполненных исследований даны следующие рекомендации: диаметр шариков 5,0-5,5 мм; соотношение радиуса кривизны дорожки качения к диаметру шариков 0,515-0,530; волнистость дорожек качения не более 0,05 мм. При этих значениях параметров подшипника момент сопротивления вращению составляет 0,5-0,6 Н · м, что ниже допустимого значения (0,8 Н · м), а статическая грузоподъемность составляет 30000-40000Н, что значительно превышает заданную ТУ (19500Н).

9. В целом конструкция подшипника 1118-2902840 удовлетворяет техническим условиям по параметрам статической грузоподъемности и моменту сопротивления вращению. В

ходе экспериментов выявлены факторы, которые позволили существенно улучшить показатели работы подшипника.

Королев Альберт Викторович –
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Технология машиностроения»
Саратовского государственного
технического университета

Korolev Albert Viktorovich –
Doctor of technical sciences, professor,
head. Department « Technology
of mechanical engineering»
of the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 04.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК: 621.778

А.В. Королев, А.Н. Аничкин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРУЗОК В КОЛЬЦЕВЫХ ДЕТАЛЯХ

Описан процесс моделирования нагрузок в кольцевых деталях, приведен расчет нагрузок в программе SolidWorks Simulation Xpress. Описан процесс построения 3D модели детали и пошагово показан процесс исследования в программе SolidWorks. Данная работа позволяет рассчитать статическое узловое напряжение, статическое перемещение, процесс деформации и запас прочности, что способствует оптимизации процесса изготовления детали.

Моделирование нагрузок, кольцевые детали, 3D модель, система автоматизированного проектирования

A.V. Korolev, A.N. Anichkin

MODELING OF LOADS IN RING DETAIL

The paper describes the modeling process loads in the ring detail, shown in the load calculation program SolidWorks Simulation Xpress. The process of constructing 3D models of details and step by step shows you how to study the program SolidWorks. This work allows us to calculate the static nodal voltage, the static displacement, the deformation process and margin, optimizing the manufacturing process details.

Modeling process loads, ring detail, 3D model, system of automatic designing

Развитие машиностроения в значительной мере определяется техническим уровнем изготавливаемых деталей, их надежностью и конкурентной ценой. Технология изготовления подшипников должна обеспечить высокую производительность и высокое качество подшипников при наименьших производственных затратах. Разработка безотходной технологии изготовления колец подшипников является актуальной задачей на сегодняшний день.

В данной работе представлен новый способ получения колец подшипников методом их навивания из металлической ленты.

Для моделирования процесса нагрузок и определения прочностных свойств кольцевых деталей была построена 3D модель данной детали. Процесс построения и расчетов проводился в программе SolidWorks Simulation Xpress.

Сущность способа изготовления деталей из металлической ленты заключается в том, что при навивке на катушку в несколько слоев металлического проката, в качестве материала металлического проката используют металлическую ленту, ленту предварительно профилируют, витки между собой закрепляют, а между витками ленты размещают связующий или антифрикционный материал.

Весь процесс моделирования проходит по следующим этапам:

1. Построение 3D модели, необходимой для расчетов.
2. Выбор параметров материала для 3D модели.
3. Выбор плоскости крепления 3D модели.

В табл. 1 приведены исходные данные для численного расчета результатов нагружения металлического кольца.

Крепления используются для «фиксации» граней модели, которые не должны перемещаться в ходе анализа. Чтобы предотвратить сбой анализа из-за движения закрепленного тела, необходимо ограничить, по крайней мере, одну грань детали. Для крепления детали были выбраны 2 плоскости: внутренняя и наружная поверхность детали.

Таблица 1

Исходные параметры

Материал	Толщина ленты, мм	Ширина ленты, мм	Масса	Объем	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм
1020 Сталь, холоднокатаная	0,2	3	0.0643 kg	8.175e-006 м ³	D=82,5	d=65,5

1. Выбор плоскости нагрузки в 3D модели

Нагрузки используются для добавления внешней силы на грани детали с целью получения напряжения и деформации детали.

Под термином сила подразумевается общая сила, которая прилагается к грани. В качестве нагрузки была выбрана плоскость, к которой приложена нормальная сила, данная сила равномерно распределена по все плоскости.

Пример: По приведенным в табл. 1 данным строим 3D модель для дальнейшего расчета и построения графических моделей детали. Деталь выполнена в виде кольца с наружным диаметром $D = 82,5$ мм и внутренним диаметром $d = 65,5$ мм. В центре кольца выполнена дорожка качения $r = 2,5$ мм и глубиной 1 мм.

На построенной модели указываем крепление детали, были выбраны 2 плоскости: внутренняя и наружная поверхность детали, была указана плоскость нагрузки, к которой приложена нормальная сила, данная сила равномерно распределена вдоль плоскости дорожки качения. Значение силы выбрано равным 150 кг, т.к. такая нагрузка наиболее распространенная на данный узел.

Значения материала детали

Имя свойства	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.05e+011	N/m ²
Коэффициент Пуассона	0.29	NA
Модуль сдвига	8e+010	N/m ²
Массовая плотность	7870	kg/m ³
Предел прочности при растяжении	4.2e+008	N/m ²
Предел текучести	3.5e+008	N/m ²
Коэффициент теплового расширения	1.17e-005	/Kelvin
Теплопроводность	51.9	W/(m.K)
Удельная теплоемкость	486	J/(kg.K)

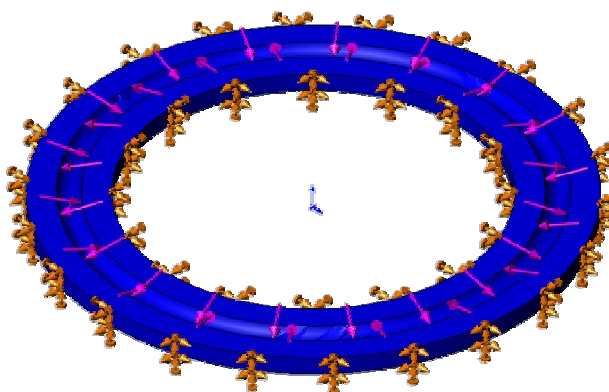


Рис. 1. Выбор плоскости крепления и плоскости нагрузки

На основе численных расчетов были получены следующие результаты:

На рис. 2 изображена модель детали находящейся под действием приложенных к ней нагрузок. По цвету модели можно отследить в каких точках деталь испытывает наибольшее и наименьшее значения нагрузок.

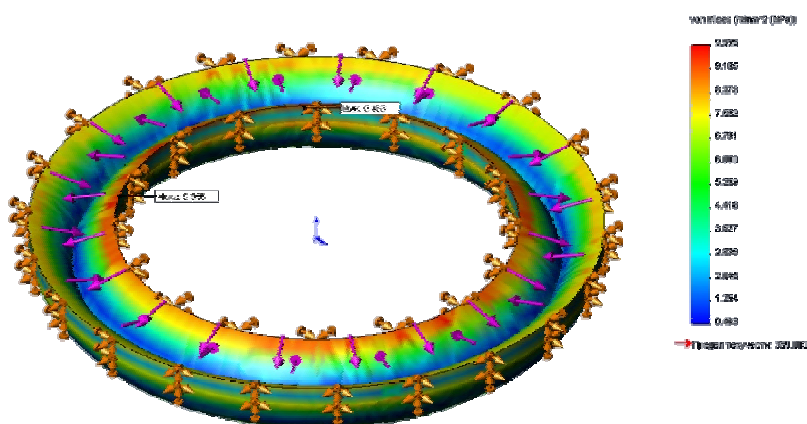


Рис. 2. Тип эпюры: статическое узловое напряжение

Min	Max
0.463091 N/mm ² (MPa)	9.95558 N/mm ² (MPa)

Из данной модели можно сделать вывод: максимальные напряжения имеют наибольшее значение у внутренней и наружной поверхности модели, а в центре модели напряжения стремятся к минимуму.

По величине напряжения кольца в различных точках можно судить о возможности нарушения целостности кольца под действием внешней нагрузки и о величине запаса прочности.

Запас прочности определяется отношением фактического напряжения к пределу текучести материала. Для расчета распределения запаса прочности в Simulation Xpress используется критерий максимального относительного напряжения. Этот критерий точно определяет, что пластичный материал начинает растягиваться, когда эквивалентное напряжение достигает предела текучести материала.

Из данной модели можно сделать вывод что: запас прочности больше, чем 1,0 – это значит, что материал в этом месте не достиг предела текучести.

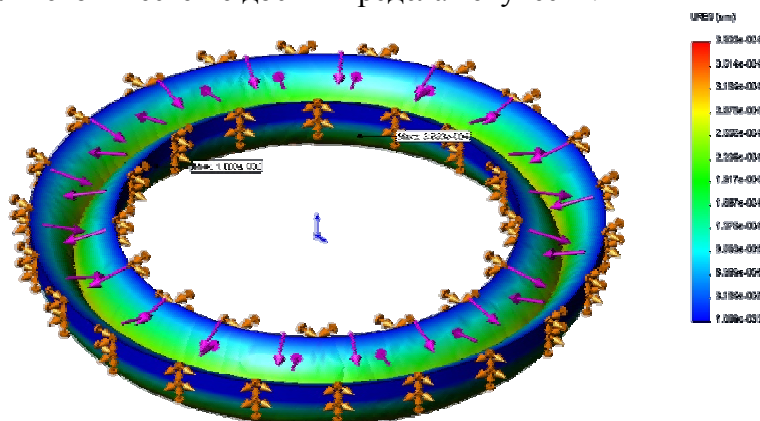


Рис. 3. Тип эпюры: статическое перемещение

Min	Max
1.000 mm	3. 833 mm

Если запас прочности (в любом месте):

- меньше 1,0, это значит, что материал в этом месте перешел предел текучести и проект небезопасен;
- равен 1,0, это значит, что материал в этом месте практически достиг предела текучести;
- больше, чем 1,0, это значит, что материал в этом месте не достиг предела текучести.

Программа Solid Works Simulation Xpress по завершению процесса моделирования выдает значения характеризующие свойства материала детали.

В табл. 2 приведены свойства материала детали, в соответствии с примером.

Полученные в таблице данные могут использоваться для других условий тепловой и механической деформации данной детали.

Вывод. В данной работе были рассчитаны статическое узловое напряжение, статическое перемещение, процесс деформации и запас прочности, что позволяет оптимизировать процесс изготовления детали.

ЛИТЕРАТУРА

1.Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.

Королев Альберт Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Korolev Albert Viktorovich – Doctor of technical sciences, professor, Head of Department « Technology of mechanical engineering » Saratov State Technical University

Аничкин Александр Николаевич – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Anichkin Aleksandr Nikolaevich – Post-graduate faculty «Technology of mechanical engineering» Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 04.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.9.04

А.В. Королев, И.М. Ивлюшина, А.И. Комиссаров

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА КОЛЕЦ

Исследован механизм разлома деталей типа колец шарнирных подшипников. Показано, что разлом происходит вследствие накопления энергии в материале детали под действием внешних сил. Чем больше затрачивается единовременной энергии на разлом, тем шире получается полоса, в пределах которой идет линия разлома. Использование в процессе разлома ультразвуковых колебаний позволяет уменьшить величину единовременной энергии деформации и повысить качество деталей.

Шарнирные подшипники, ультразвуковой разлом, разрушение, качество

A.V. Korolev, I.M. Ivlyushina, A.I. Komissarov

MECHANISM OF DESTRUCTION DETAILS TYPE OF THE RINGS

The mechanism of fracture parts such as rings, swivel bearings. Shown that the fault is due to the accumulation of energy in the material details of the action of external forces. The more energy expended one-time break, the wider the band is obtained, within which is a fault line. Using a process fault ultrasonic vibrations to reduce the value of a one-time deformation energy and improve the quality of parts.

Spherical plain bearings, ultrasonic fault, failure, and quality

Обычно расчеты на прочность деталей производят из условия, что тело разрушается, если в нем возникают напряжения, превышающие предел прочности. Но так как предел прочности материала деталей не является постоянной величиной, при расчетах вводят коэффициенты запаса прочности. Коэффициенты определяются эмпирическим путем и поэтому не всегда себя оправдывают.

Более обоснованным является определение коэффициента запаса прочности исходя из расчета вероятности разрушения тела. В [1-5] предложена энергетическая теория разрушения хрупких тел. В этих работах показано, что распределение величины критического объема ма-

териала детали, в котором возникают критические напряжения, подчиняется экспоненциальному закону:

$$f(V) = \frac{1}{V} \cdot \exp\left(-\frac{V}{V_0}\right), \quad (1)$$

где V – средний разрушаемый объем материала, в котором содержится хотя бы одна трещина критической величины или любой другой дефект, приводящий к разрушению.

В свою очередь, разрушенный объем металла зависит от энергии деформации внешних сил:

$$V = \frac{A_i \cdot j}{A_0}, \quad (2)$$

где A_i – единовременная энергия деформации внешних сил, Дж; A_0 – внутренняя энергия насыщения материала, Дж/м³; j – коэффициент полезного действия внешних сил.

Энергия деформации материала детали A_i , возникающая под действием внешних сил, превращается в потенциальную энергию возникающих напряжений. Величина j является коэффициентом пропорциональности между работой внешних сил и приобретаемой в результате этой работы внутренней потенциальной энергией.

Из формулы (2) следует, что чем больше деталь получает энергии от внешних источников, тем больший объем материала детали находится под угрозой разрушения. Это оказывает влияние на форму линии разлома, что является одним из важных показателей качества подшипников.

Если площадь поперечного сечения детали равна F , то линия разлома детали должна проходить внутри полосы шириной

$$a = V / F = \frac{A_i \cdot j}{A_0 \cdot F}. \quad (3)$$

Равенство (3) показывает, что ширина полосы разлома, а следовательно, шероховатость линии разлома существенно уменьшается при уменьшении внешней единовременной энергии A . Этого можно добиться, если подавать внешнюю энергию многократно малыми порциями путем наложения на инструмент ультразвуковых колебаний при соблюдении условия, что суммарная энергия деформации детали с учетом рассеивания энергии деформации в окружающую среду равна внутренней энергии насыщения материала:

$$j \cdot \sum_i^c A_i = A_0, \quad (4)$$

где A_i – энергия деформации детали, получаемая при i -м цикле нагружения; c – общее число циклов нагружения.

Например, известно, что величина деформации детали в виде кольца равна

$$u = \frac{P \cdot D^3}{8 \cdot E \cdot J_0} \cdot K_1 + \frac{P \cdot D}{2 \cdot E \cdot F} \cdot K_2. \quad (5)$$

где S_m – максимальное напряжение изгиба, МПа; D – наружный диаметр кольца, мм; E – модуль упругости материала детали, МПа; F – площадь поперечного сечения детали, мм²; J_0 – момент инерции поперечного сечения детали относительно центральной оси; K_1 и K_2 – коэффициенты, зависящие от числа точек приложения внешней нагрузки; d – диаметр отверстия детали, мм².

Тогда энергия деформации детали под действием силы P равна

$$A = \frac{P^2 \cdot D^3}{16 \cdot E \cdot J_o} \cdot K_1 + \frac{P^2 \cdot D}{4 \cdot E \cdot F} \cdot K_2. \quad (6)$$

Примем следующую схему разлома. Вначале нагружаем деталь силой P_n , которая заведомо меньше силы P_o , при которой обычно возникает разлом детали при однократном нагружении:

$$P_o = \frac{S_o \cdot W}{K_S \cdot d}, \quad (7)$$

где S_o – предел прочности материала детали на изгиб; W – момент сопротивления изгибу; K_S – коэффициент, зависящий от числа точек приложения нагрузки.

Из равенства (6) и (7)

$$A_o = \frac{S_o^2 \cdot W^2 \cdot D^3}{16 \cdot E \cdot J_o \cdot d^2} \cdot \frac{K_1}{K_a} + \frac{S_o^2 \cdot W^2 \cdot D}{4 \cdot E \cdot F \cdot d^2} \cdot \frac{K_2}{K_a}. \quad (8)$$

Для сохранения исходной геометрической формы детали желательно, чтобы нагрузка на деталь не вызывала в детали напряжения выше предела упругости. На эту деформацию в соответствии с (6) затрачиваем энергию, равную

$$A_n = \frac{P_n^2 \cdot D^3}{16 \cdot E \cdot J_o} \cdot K_1 + \frac{P_n^2 \cdot D}{4 \cdot E \cdot F} \cdot K_2, \quad (9)$$

где

$$P_n \leq \frac{S_u \cdot W}{K_S \cdot d},$$

S_u – предел упругости материала детали.

Затем детали сообщаем циклическую деформацию с амплитудой a по синусоидальному закону:

$$u_t = a \cdot \sin(2 \cdot p \cdot n \cdot t + y), \quad (10)$$

где n – частота деформации детали; t – время от начала циклических деформаций; y – сдвиг фазы начала деформаций.

Элементарная энергия деформации за время dt :

$$dA = P_t \cdot du.$$

Выражая с помощью равенства (5) силу через деформацию и учитывая равенство (10), имеем

$$dA = \frac{2 \cdot p \cdot n \cdot a^2}{\frac{D^3}{8 \cdot E \cdot J_o} K_1 + \frac{D}{2 \cdot E \cdot F} K_2} \sin^2(2 \cdot p \cdot n \cdot t + y) \cdot \cos(2 \cdot p \cdot n \cdot t + y) \cdot dt \quad (11)$$

Интегрируя равенство (11) по времени t в пределах времени осуществления одного полуцикла, найдем работу сил деформации кольца за один произвольный i -й цикл:

$$A_i = \frac{2 \cdot p \cdot n \cdot a^2}{\frac{D^3}{8 \cdot E \cdot J_o} K_1 + \frac{D}{2 \cdot E \cdot F} K_2} \int_{\frac{1}{4n}}^{\frac{3}{4n}} \sin^2(2 \cdot p \cdot n \cdot t + y) \cdot \cos(2 \cdot p \cdot n \cdot t + y) \cdot dt \cdot$$

После интегрирования получаем

$$A_i = \frac{0.667 \cdot a^2}{\frac{D^3}{4 \cdot E \cdot J_o} K_1 + \frac{D}{E \cdot F} K_2} \quad (12)$$

Подставляя найденное значение единовременной энергии деформации в равенство (3), определим ширину полосы, в пределах которой может проходить линия разлома детали:

$$h = \frac{1}{A_o \cdot F} \frac{0.667 \cdot a^2 \cdot j}{\left(\frac{D^3}{4 \cdot E \cdot J_o} K_1 + \frac{D}{E \cdot F} K_2 \right)} \quad (13)$$

Из равенства (13) видно, что чем меньше амплитуда колебаний кольца в процессе разлома, тем уже возникает полоса разлома, а следовательно, выше получается качество обработки.

Найдем время, необходимое для ультразвукового разлома. За время t нагружения детали будет затрачена энергия, равная

$$A_t = A_n + \sum_{i=1}^{c=t/n} A_i = \frac{P_n^2 \cdot D^3}{16 \cdot E \cdot J_o} \cdot K_1 + \frac{P_n^2 \cdot D}{4 \cdot E \cdot F} \cdot K_2 + \frac{0,667 \cdot a^2 \cdot t}{n \cdot \left(\frac{D^3}{4 \cdot E \cdot J_o} K_1 + \frac{D}{E \cdot F} K_2 \right)} \quad (14)$$

Из равенств (4) и (14) найдем

$$t = \frac{A_o}{j \cdot \left(\frac{P_n^2 \cdot D^3}{16 \cdot E \cdot J_o} \cdot K_1 + \frac{P_n^2 \cdot D}{4 \cdot E \cdot F} \cdot K_2 + \frac{0,667 \cdot a^2 \cdot t}{n \cdot \left(\frac{D^3}{4 \cdot E \cdot J_o} K_1 + \frac{D}{E \cdot F} K_2 \right)} \right)} \quad (15)$$

Выражение (15) показывает, что чем ниже нагрузка на деталь и меньше амплитуда колебаний инструмента, тем большее время требуется на обработку.

Выводы

Результаты выполненных исследований позволяют оптимизировать операцию разлома деталей, обеспечив максимальную производительность при допустимых параметрах качества детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев А.В. Вероятностные основы разрушения материалов / А.В. Королев // Доклады Российской академии естественных наук. 1999. №1. С. 194-201.
2. Королев А.В. Механизм безотходного технологического разлома деталей / А.В. Королев, А.М. Чистяков // Доклады Российской академии естественных наук. 1999. №1. С. 201-207.
3. Чистяков А.М. Совершенствование технологии точного машиностроения на основе локализации технологической энергии и управления ее параметрами: дис. ... д-ра техн. наук / А.М. Чистяков. Саратов, 1999. 346 с.
4. Чистяков А.М. Ресурсосберегающие технологии подшипникового производства с управляемыми параметрами технологической энергии / А.М. Чистяков. Саратов: СГТУ, 1998. 209 с.
5. Королев А.В. Новые прогрессивные технологии машиностроительного производства. Ч. 6. Энергосберегающая технология безотходного разделения изделий на основе локально направленного разлома / А.В. Королев, А.М. Чистяков, В.В. Болкунов. Саратов: СГТУ, 1998. 124 с.

Королев Альберт Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Korolev Albert Viktorovich – Doctor of technical sciences, professor, head of Department «Technology of mechanical engineering» Saratov State Technical University

Ивлюшина Ирина Михайловна – преподаватель Вологодского государственного технического университета

Ivlyushina Irina Mikhailovna – Teacher of the Vologda State Technical University

Комиссаров Александр Игоревич – студент кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Komissarov Alexander Igorevich – Student of the Department «Mechanical Engineering» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 11.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.9.06.08

Ю.А. Кривошеин, М.В. Виноградов

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ФРИКЦИОННЫХ ПЕРЕДАЧ ПРЕЦИЗИОННОГО ТОКАРНОГО МОДУЛЯ

Рассмотрены вопросы взаимодействия элементов трибосопряжений многоступенчатых фрикционных передач.

Фрикционная передача, трибосопряжение, скольжение

Ju.A. Krivoshein, M.V. Vinogradov

THE ANALYSIS OF PARAMETERS MULTISTAGE FRICTION GEARS OF THE PRECISION TURNING MODULE

Questions of frictional contact of elements of multistage friction gears are considered.

Friction gear, friction, sliding

В современном автоматизированном прецизионном технологическом оборудовании и контрольно-измерительных машинах все более широко применяются многоступенчатые фрикционные передачи, позволяющие при определенных условиях обеспечить показатели точности, недостижимые с помощью других механических передач. Например, применение многоступенчатых фрикционных передач в металлорежущих станках (МРС) обеспечивает при их рациональной компоновке значительное упрощение кинематических цепей, высокий

КПД (до 98%), отсутствие люфтов, приемлемую технологичность, низкий уровень вибраций, плавность перемещений [3].

Однако опыт промышленной эксплуатации приводов с такими передачами выявил ряд факторов, снижающих их эксплуатационную надежность. Сложный характер физико-технических процессов в трибосопряжениях (ТС) фрикционных передач обуславливает необходимость исследования влияния состояния поверхностей сопрягаемых элементов на характер их взаимодействия, определяющий функциональную надежность.

Системный анализ взаимодействия элементов ТС фрикционных передач и исследование их поверхностей после стендовых испытаний и производственной эксплуатации показывают, что поверхностные слои изменяются в основном под действием знакопеременных деформаций в зоне контакта, а также в результате действия физических и химических полей окружающей среды.

Тяговые свойства фрикционных многоступенчатых передач во многом определяются величиной коэффициента трения между элементами их ТС. Основная зависимость, определяющая работоспособность фрикционных передач, имеет вид [1]

$$F \cdot f = b_c \cdot F_T, \quad (1)$$

где F – сила прижатия роликов; f – коэффициент трения; b_c – запас сцепления (для силовых передач $b_c = 1,2 \dots 2,0$; для приборных $b_c = 2,0 \dots 3,0$); F_T – передаваемая окружная сила.

Из уравнения (1) видно, что для обеспечения функциональной надежности фрикционных передач необходимо обеспечить стабильное и высокое значение коэффициента трения между элементами их ТС, что позволит уменьшить требуемую силу прижатия. Геометрические и кинематические соотношения фрикционных передач определяются при условии отсутствия проскальзывания между рабочими телами. Скольжение в этих передачах нарушает равномерность движения ведомого звена, приводит к износу поверхностей элементов ТС. Различают три вида скольжения: упругое скольжение, буксование и геометрическое скольжение [2].

Передача движения фрикционными передачами сопровождается упругим скольжением – относительным перемещением точек соприкосновения взаимодействующих элементов, обусловленным различием их упругих деформаций в месте соприкосновения и в направлении передачи движения. Упругие ролики ТС фрикционной передачи, прижатые один к другому, в результате упругих деформаций соприкасаются по поверхности (рисунок). Ширина поверхности касания для ТС ролик – ролик [2]

$$b = \sqrt{\frac{4 \cdot \Theta \cdot F \cdot r_1 \cdot r_2}{p(r_1 + r_2) \cdot l}}, \quad (2)$$

для ТС ролик – шток

$$b = \sqrt{\frac{4 \cdot \Theta \cdot F \cdot r}{p \cdot l}}, \quad (3)$$

где $\Theta = (1 - m_1^2)/E_1 + (1 - m_2^2)/E_2$; r_1 – радиус роликов; l – длина площадки касания; m_i – коэффициент Пуассона ($m = 0,3$ для стали); E_i – модуль упругости ($E = 2,1 \times 10^5$ МПа для стали).

При больших усилиях прижатия на площадке касания возникают значительные контактные напряжения, носящие переменный характер. Под действием моментов M_1 и M_2 , а также сил трения в месте соприкосновения F_{21} или F_{12} элементы роликов сжимаются и растягиваются в разных зонах взаимодействия. По периметру поверхностей роликов в месте соприкосновения можно выделить три характерные зоны. На ведущем ролике в зоне I_1 происходит сжатие и искривление поверхностных слоев, уменьшающееся по мере удаления от поверхности, далее в зоне II_1 они находятся в сжатом состоянии, затем в зоне III_1 происходит их растяжение. На ведомом ролике в зоне I_2 происходит растяжение поверхностных слоев,

уменьшающееся в глубину от поверхности, при этом точки на поверхности ролика 1 скользят относительно точек на поверхности ролика 2. В зоне Π_2 поверхностные слои находятся в растянутом состоянии, при этом точки роликов 1 и 2 относительно друг друга неподвижны, их скорости V_1 и V_2 одинаковы, в зоне Π_3 растягивающие усилия снимаются и поверхностные слои ролика 2 сжимаются, при этом точки на поверхности ролика 2 скользят относительно точек на поверхности ролика 1. Так как скольжение точек колеса 2 относительно точек колеса 1 направлено навстречу скорости V_2 , недеформированные элементы ролика 2 движутся с меньшей окружной скоростью, чем скорость элементов ролика 1. Угловая скорость w_2 меньше величины, обусловленной только геометрическими соотношениями недеформируемых тел. Передаточное отношение

$$i_{1-2} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{r_2}{r_1} (1 + x), \quad (4)$$

где x – коэффициент упругого скольжения, для пары сталь по стали $x = 0,001 - 0,003$ [64].

Без упругого скольжения передача движения в фрикционных механизмах невозможна, для обеспечения высокого модуля упругости, уменьшения скольжения и гистерезисных потерь на деформацию, высокой контактной выносливости, стойкости к износу и заеданию, высокой теплопроводности элементов ролики фрикционных передач изготавливают из легированных сталей и подвергают закалке до твердости HRC 55...60 с обеспечением низкой шероховатости поверхностей трения ($R_a = 0,32...1,23$ мкм).

Для того чтобы в рассматриваемых фрикционных передачах с параллельными валами не происходило геометрического скольжения, линия контакта элементов ТС должна быть параллельна валам.

Буксование возникает при перегрузках, когда передаваемая сила F_{12} больше силы трения F_{21} (рисунок). В этом случае ведомое звено затормаживается или даже останавливается, а ведущее продолжает двигаться, вызывая выделение теплоты и местный износ рабочей поверхности ведомого звена, нарушая его правильную форму, следствием чего являются вибрации и удары.

При больших усилиях прижатия переменные контактные напряжения при многократном приложении вызывают усталостное разрушение поверхностей элементов ТС, при небольших усилиях прижатия возможно пробуксовывание под воздействием нагрузки на фрикционную передачу, что может привести к интенсивному локальному изнашиванию поверхностей элементов и изменению их геометрии (появлению лунок и лысок), вызывающему неравномерность скорости выходного звена, появлению ударных нагрузок, что обуславливает возрастание вибраций, увеличение потерь в фрикционной передаче, то есть приводит к функциональным отказам при эксплуатации.

Используемые в приводах подачи на токарных модулях типа ТПАРМ многоступенчатые фрикционные передачи имеют ограничения по величине развиваемой силы на штоке, причем верхний предел, в наиболее нагруженном ТС, связан с величиной контактного напряжения сжатия, определяемого уравнением Герца-Беляева [2]

$$\sigma_{сж, доп} > \sigma_{сж, max} = 0,418 \sqrt{\frac{F \cdot E}{b \cdot p}}, \quad (5)$$

где $\sigma_{сж, доп}$ – допускаемое контактное напряжение сжатия (для закаленной стали $\sigma_{сж, доп} = 800$ МПа); $E = 2E_1 \cdot E_2 / (E_1 + E_2)$ – приведенный модуль упругости; $p = r_1 \cdot r_2 / (r_1 + r_2)$ – приведенный радиус кривизны.

Нижний предел связан с пробуксовкой роликов в случае, когда сила резания становится сравнимой с $F_{шт, max}$. В первом случае снижается долговечность фрикционной передачи, во втором – резко снижается эксплуатационная надежность приводов подачи и всего модуля в целом.

Анализ передаточного отношения многоступенчатых фрикционных передач приводов подачи показывает, что проскальзывание элементов их ТС необходимо учитывать введением в формулу передаточного отношения коэффициента относительного скольжения x_c

$$i_{\text{ФП}} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{r_2}{r_1(1-x_c)} \quad (6)$$

Сохранение постоянного значения передаточного отношения многоступенчатой фрикционной передачи $i_{\text{мфп}}$ определяет точность передачи, которую можно оценить погрешностью изменения линейной скорости штока. Величина $i_{\text{мфп}}$ модулей ТПАРМ для разных модификаций составляет от 20 до 10000. Анализ изменения величины скорости штока $V_{\text{шт}}$ для трехступенчатой передачи, имеющей $i_{\text{фп}} = 100$, показывает, что в идеальном случае, когда значения всех параметров постоянны, а скольжение отсутствует, скорость штока определяется выражением

$$V_{\text{шт}} = w_1 \cdot i_{\text{мфп}} \cdot r_7, \quad (7)$$

где $i_{\text{мфп}} = i_{12} \times i_{34} \times i_{56}$; w_1 – угловая скорость первого ролика связанного с двигателем привода подачи; i_{12} ; i_{34} ; i_{56} – передаточные отношения соответствующих ступеней передачи; r_7 – радиус седьмого ролика, непосредственно определяющий скорость штока,

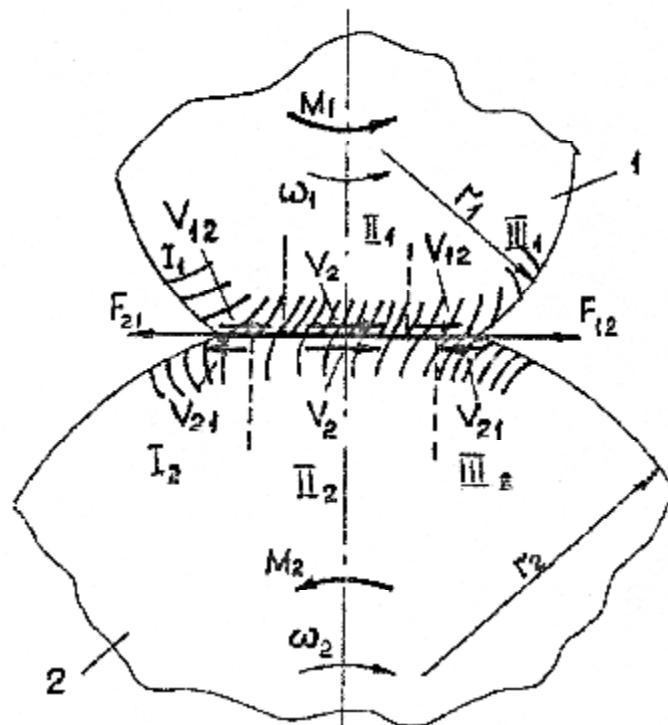


Схема возникновения упругого скольжения

Для двухступенчатых фрикционных передач приводов подачи токарных модулей, при заданных допускаемых отклонениях реальных размеров роликов их влияние на погрешность скорости штока по величине не превосходит значения $3 \cdot 10^{-4}$ и ими можно пренебречь, а основной доминирующий вклад в погрешность вносит скольжение элементов ТС передачи [3, 4].

При использовании многоступенчатых фрикционных передач в замкнутой системе привода подачи токарных модулей типа ТПАРМ величина x_c , на первый взгляд, существенного значения не имеет, однако при динамических нагрузках (разгон, торможение, реверс, работа привода в режиме стружкодробления) она в значительной степени влияет на динамические свойства привода подачи. В условиях эксплуатации это приводит к отказам, то есть аварийным остановкам токарного модуля из-за срабатывания блокировки «несовпадение координат», а так-

же искажению профиля при обработке сложных поверхностей, отсутствию стружкодробления при обработке вязких материалов. Очевидно, что величина x_c является важной характеристикой многоступенчатой фрикционной передачи, позволяющей объективно оценить ее потребительские свойства с учетом различных факторов, которые трудно определить в явном виде (например, перекос осей роликов или локальный износ рабочих поверхностей элементов ТС).

С учетом относительного скольжения передаточное число многоступенчатой фрикционной передачи, имеющей m ступеней в общем виде можно определить по уравнению

$$i_{\text{мфп}} = \frac{r_2 \cdot r_4 \dots r_n}{r_1(1-x_{c1})r_3(1-x_{c2}) \dots r_{n-1}(1-x_{cm})}, \quad (8)$$

где $n = 2m$ – число рабочих элементов (роликов) ТС передачи.

Если раскрыть скобки в этом уравнении и пренебречь членами второго порядка малости, то можно записать

$$i_{\text{мфп}} = (i_{12} \cdot i_{34} \dots i_m) \left(1 - \sum_{k=1}^m x_{ck} \right). \quad (9)$$

Если также учесть относительное скольжение в ТС ролик-шток, то скорость штока нагруженной трехступенчатой фрикционной передачи будет определяться выражением

$$V_{\text{шт}} = w_1 \cdot i_{\text{мфп}} \cdot r_7 [1 - (x_{c1} + x_{c2} + x_{c3} + x_{c4})], \quad (10)$$

а относительное изменение скорости штока будет

$$\Delta V_{\text{шт}} = \frac{V_{\text{Ошт}} - V_{\text{шт}}}{V_{\text{Ошт}}}. \quad (11)$$

Анализ приведенных уравнений показывает, что относительное скольжение в общем случае определяется величиной прижимной силы элементов ТС, величиной внешней нагрузки на выходное звено, количеством ступеней в передаче и состоянием рабочих поверхностей элементов ТС. В реальных фрикционных передачах определение скоростей роликов и штока имеет определенные сложности из-за высоких требований к точности измерений, так как x_c имеет малые значения, а передача работает в реверсивном режиме с односторонней силовой нагрузкой.

Наличие на поверхностях роликов вторичных структур, попадание пыли, адсорбированной влаги, масляных пленок и продуктов органического происхождения существенно влияет на величину флуктуаций коэффициента трения. Экспериментальные исследования величины f на промышленных многоступенчатых фрикционных передачах при различных условиях эксплуатации и в лабораторных условиях, для различных состояний поверхностей трения, показали следующие значения $f = 0,12 - 0,2$ для ТС ролик – ролик; $f = 0,21 - 0,41$ для ТС ролик – шток, что отличается от справочных значений, рекомендуемых для расчетов. В реальных производственных условиях на рабочих поверхностях элементов ТС имеются продукты изнашивания, пленки адсорбированной влаги и технологических жидкостей, масляные и разные другие загрязнения, то есть многоступенчатые фрикционные передачи при работе без смазки (условно сухие) имеют параметры ниже, чем в случае работы со смазкой.

Для экспериментальной проверки влияния смазки на эксплуатационную надежность формообразующих узлов токарных модулей были проведены сравнительные испытания многоступенчатых фрикционных передач при работе со смазкой и без смазки.

При работе фрикционных передач без СМ продукты фрикционной коррозии на рабочих поверхностях элементов ТС появляются через 1-2 минуты работы, вначале на первых, а затем на последних ступенях. При работе со смазкой рабочие поверхности оставались чистыми после 300 часов испытаний. Результаты сравнительных испытаний показали, что реальные многоступенчатые фрикционные передачи при работе без смазки и при работе в ус-

ловиях погружения в масляную ванну обеспечивают на выходном звене сопоставимое тяговое усилие. Кроме того, наличие смазки стабилизирует функциональные параметры передачи за счет защиты элементов ТС от внешних загрязнений и воздействия атмосферы окружающей среды, а также способствует удалению из зоны контакта продуктов изнашивания, образующихся при трении, и тем самым повышает эксплуатационную надежность формообразующих узлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пронин В.А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи / В.А. Пронин, Г.А. Равнов. М.: Машиностроение, 1980. 320 с.
2. Крагельский И.В. Узлы трения машин: справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
3. Управление надежностью трибосопряжений автоматизированных станков / Ю.А. Кривошеин, А.А. Игнатьев, М.В. Виноградов и др. // Точность технологических и транспортных систем: сб. ст. Междунар. конф. Пенза: ПГУ, 1998. С. 50-52.
4. Кривошеин Ю.А. Определение информативных параметров контактирования трибосопряжений / Ю.А. Кривошеин, М.В. Виноградов // Управляющие и вычислительные комплексы в машино- и приборостроении: межвуз. сб. Саратов, 1999. С. 47-50.

Кривошеин Юрий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Krivoshein Jury Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, The senior lecturer of chair «Automation and control of technological processes» Saratov State Technical University

Виноградов Михаил Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Vinogradov Michael Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, The senior lecturer of chair «Automation and control of technological processes» Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 04.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.867

О.А. Лускань

РЕАЛИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВ НА ИМПУЛЬСНОМ ТЕЛЕЖЕЧНОМ КОНВЕЙЕРЕ В ИНЖЕНЕРНОМ РАСЧЁТЕ

Рассмотрена методика инженерного расчёта с рекомендациями по выбору основных параметров импульсного тележечного конвейера, разработанная на основе проведённых теоретических и экспериментальных исследований процесса движения тележек с грузами на конвейере.

Груз, тележка-спутник, механизм свободного хода, инерция, транспортирование

О.А. Luskan'

REALIZATION OF RESEARCHES PARAMETERS MOVEMENT CARGOES ON PULSE CART CONVEYOR IN ENGINEERING CALCULATION

In article the technique of engineering calculation with recommendations for choice key parameters pulse cart conveyor, developed on the basis of spent theoretical and experimental researches of process of movement of carts with cargoes on the conveyor is considered.

Cargo, the cart-companion, the free wheeling mechanism, inertia, transportation

Проведенные теоретические исследования процесса транспортирования штучных грузов на импульсных тележечных конвейерах [1], адекватность которых подтверждается экспериментальными данными, позволяют разработать рекомендации по проектированию таких устройств, которые могут использоваться в качестве заводского транспорта в условиях гибких производственных систем.

В качестве исходных данных для расчета необходимо знать массу транспортируемого груза – m_{zp} ; габариты груза: длина \times ширина \times высота, $SxB_{гр}xH$; параметры ходовой части и грузоподъемность тележек (выбираются в зависимости от размеров и массы перемещаемых грузов); длину l и ширину B платформы тележки (принимается на 100...150 мм больше соответствующих габаритных размеров груза); массу тележки m_m (может быть определена ориентировочно либо после проведения прочностных расчётов); длину транспортирования – L_{mp} ; интенсивность подачи грузов, которая может характеризоваться производительностью – Π или средней скоростью транспортирования груза на тележке – ϑ_{zp}^{cp} . Производительность конвейера зависит от скорости перемещения тележки с грузом. Например, рекомендуемые скорости движения тележки принимают от 1,2 до 7,5 м/мин [2], что соответствует значениям 0,02 – 0,125 м/с, в этом случае одним из важных факторов является расчет интенсивности грузопотока, которая напрямую зависит от времени обработки детали на технологическом оборудовании.

В качестве искомым параметров определяется расположение тележек с грузами на конвейере (шаг расстановки) в зависимости от средней скорости транспортирования и производительности (интенсивности); выбираются параметры привода рамы конвейера; подбираются остановы, вмонтированные в опорные катки тележки. Далее проводится уточненный расчёт параметров колебаний рамы конвейера и определяется мощность привода конвейера.

Шаг расстановки груза на конвейере определяется в зависимости от заданной производительности и средней скорости транспортирования груза:

$$a_n = \frac{\vartheta_{zp}^{cp} (m_{zp} + m_m) z}{\Pi}, \quad (1)$$

где a_n – шаг расположения тележек на конвейере; z – количество тележек на конвейере.

По номограмме (рисунок) в зависимости от средней скорости транспортирования – ϑ_{zp}^{cp} и приведённого коэффициента сопротивления движения гружёной тележки – δ_m , предварительно принимаются угловая скорость – ω и амплитуда колебаний рамы – A . Полученные значения уточняются в зависимости от масс тележки и транспортируемого груза, конструктивных параметров тележки, рамы конвейера.

Определение параметров ходовой части тележечного конвейера проводится в соответствии с ГОСТ 5938-73, при этом ширина платформы тележки B принимается равной 500, 650, 800, 1000, 1200 мм и каждому из этих значений ширины соответствуют три-четыре значения длины l платформы 650, 800, 1000, 1250, 1600, 2000 и 2500 мм.

Для определения диаметра опорного ходового катка тележки необходимо знать воспринимаемую им нагрузку. Расчетная нагрузка на каток $F_{ок}$ принимается приближенно по формуле $F_{ок}=0,25(m_{zp}+m_m)g$.

Для более точного определения диаметра опорного ходового катка необходимо провести проектировочный расчет механизмов свободного хода (остановов). Основной характеристикой подбора остановов является максимальный крутящий момент, передаваемый обгонной муфтой и возможность встраивания ее в каток:

$$M_{кр} = a_m m_m \frac{D_{ок}}{2}, \quad (2)$$

где a_m – максимальное ускорение тележки с грузом; $D_{ок}$ – диаметр опорного ходового катка тележки.

Предварительно максимальное ускорение тележки с грузом принимается равным максимальному ускорению рамы:

$$a_m = A\omega^2.$$

Уточненный расчет параметров колебаний рамы конвейера проводится в зависимости от принятых размеров тележки с определением массы вращающихся частей опорных катков тележки – m_k , составляющей 80% массы опорного катка – $m_{ок}$. Следует отметить, что необходима проверка условий по формуле (3) для выбора рациональных параметров колебаний рамы:

$$\begin{cases} \frac{m_m + m_{zp}}{m_m + m_{zp} + m_k} \geq \frac{2}{3} \\ \frac{m_{вок}}{m_m + m_{zp} + m_k} \leq \frac{1}{3} \end{cases}. \quad (3)$$

Затем конструктивно определяются габариты рамы и в зависимости от количества и массы перемещаемых тележек с грузами проводятся проектировочные и прочностные расчёты рамы конвейера с определением её массы, подбора опорных катков, расчета их осей и подшипников.

Определение приведенного коэффициента сопротивления движения тележки производится с учетом их количества одновременно установленных на конвейере:

$$\delta_m = \frac{zW_m}{(m_{zp} + m_m)g}, \quad (4)$$

где z – количество тележек, одновременно расположенных на конвейере; W_m – общее сопротивление движения тележки с грузом по направляющим:

$$W_m = W_1 + W_2 + W_3 + W_4, \quad (5)$$

где W_1 – сила сопротивления движению тележки по направляющим:

$$W_1 = (m_{zp} + m_m) \frac{gd_{цкм}}{D_{ок}} f; \quad (6)$$

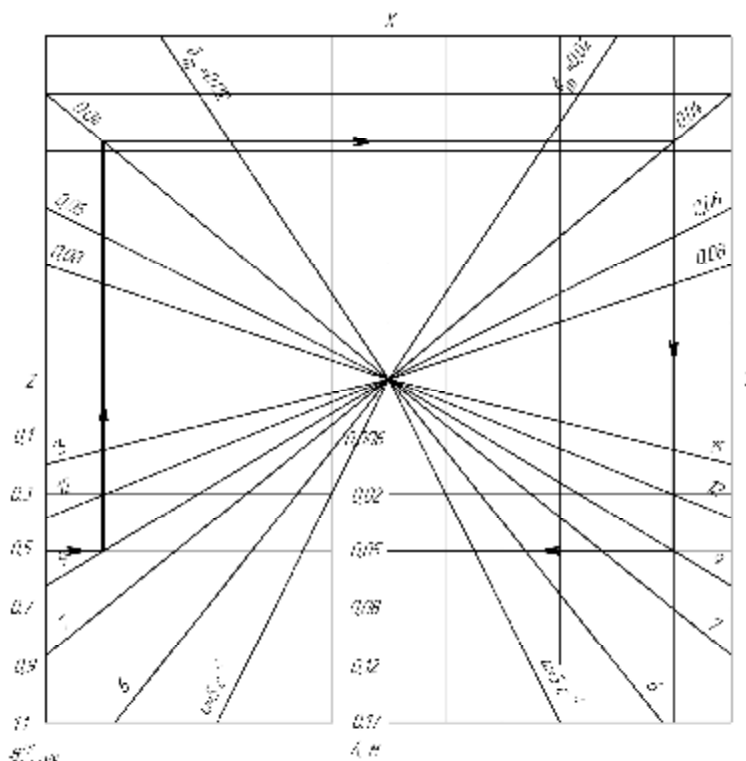
где $d_{цкм}$ – диаметр цапфы опорного катка тележки; f – коэффициент трения, приведенный к диаметру цапфы опорного катка; W_2 – сила трения качения тележки с грузом по направляющим:

$$W_2 = (m_{zp} + m_m) g \frac{2\mu}{D_{ок}}, \quad (7)$$

где μ – приведенный коэффициент трения качения катка тележки по направляющим; W_3 – сила сопротивления, возникающая при работе механизмов свободного хода, смонтированных в опорный ходовой каток тележки:

$$W_3 = z_k(m_{zp} + m_m)gk_{мсx}, \quad (8)$$

где $k_{мсx}$ – приведенный коэффициент трения при взаимодействии вращающихся элементов механизма свободного хода; z_k – количество опорных ходовых катков тележки, оснащённых остановами.



Номограмма для определения численных значений параметров колебаний рамы импульсного тележечного конвейера

В случае установки двух и более конвейеров, работающих в противофазе от одного привода с целью снижения динамических нагрузок на привод и фундамент, приведенный коэффициент сопротивления движению рамы конвейера определяется

$$\delta_k = \frac{W_k c}{(m_{pk} + m_{zp})g}, \quad (9)$$

где W_k – общая сила сопротивления движению рамы с гружёными тележками; c – количество конвейеров, работающих от одного привода; m_{pk} – масса рамы конвейера, определяемая после уточнённого прочностного расчета металлоконструкции.

Общая сила сопротивления движению рамы с грузом определяется по формуле

$$W_k = W_4 + W_5, \quad (10)$$

где W_5 – сопротивление от силы трения в опорных катках конвейера:

$$W_4 = (m_{pk} + (m_{zp} + m_m)z + m_{окр}z_{кр}) \frac{gd_{цкр}}{D_{кр}} f_2, \quad (11)$$

где $m_{окр}$ – масса вращающегося опорного катка рамы конвейера; $z_{кр}$ – число опорных катков рамы; $d_{цкр}$ – диаметр цапфы опорного катка рамы; $D_{кр}$ – наружный диаметр опорного катка рамы; f_2 – коэффициент трения, приведенный к диаметру цапфы опорного катка рамы конвейера; W_5 – сопротивление от силы трения качения катков:

$$W_5 = (m_{pk} + (m_{cp} + m_m)z) \frac{2\mu_1 g z_{kp}}{D_{kp}}, \quad (12)$$

где μ_1 – приведенный коэффициент трения качения опорного катка рамы по направляющим.

Угловая скорость привода уточняется на основании выражения, полученного из условия отсутствия проскальзывания между опорными ходовыми катками тележки и направляющих:

$$\omega = \frac{1}{2\pi \vartheta_{cp}^{cp}} \cdot \left[\frac{g \left(f^2 + 4f\delta_m \frac{m_m}{m_m + m_k} + 3\delta_m^2 \left(\frac{m_m}{m_m + m_k} \right)^2 \right)}{4\pi\delta_m \frac{m_m}{m_m + m_k}} \right] \times \left(\frac{2\pi \left(f + \delta_m \frac{m_m}{m_m + m_k} \right)^2}{f^2 + 4f\delta_m + 3\delta_m^2 \left(\frac{m_m}{m_m + m_k} \right)^2} - \sin \left(\frac{2\pi \left(f + \delta_m \frac{m_m}{m_m + m_k} \right)^2}{f^2 + 4f\delta_m \frac{m_m}{m_m + m_k} + 3\delta_m^2 \left(\frac{m_m}{m_m + m_k} \right)^2} \right) \right) - \left[\frac{2g\pi^2\delta_m \frac{m_m}{m_m + m_k} \left(f + \delta_m \frac{m_m}{m_m + m_k} \right)^4}{\left(f^2 + 4f\delta_m \frac{m_m}{m_m + m_k} + 3\delta_m^2 \left(\frac{m_m}{m_m + m_k} \right)^2 \right)^2} \right] \quad (13)$$

Максимально допустимая амплитуда колебаний рамы также определяется из условия отсутствия проскальзывания тележки относительно направляющих в зависимости от полученной угловой скорости привода конвейера по выражению

$$A \leq \frac{g \left(f^2 + 4f\delta_m \frac{m_m}{m_m + m_k} + 3\delta_m^2 \left(\frac{m_m}{m_m + m_k} \right)^2 \right)}{4\omega^2 \pi \delta_m \frac{m_m}{m_m + m_k} \left(1 - \frac{m_k}{m_m + m_k} \right)}. \quad (14)$$

После уточненного определения параметров колебаний рамы конвейера по формулам (13) и (14) необходимо определить время цикла $T=2\pi/\omega$ и время свободного движения тележки с грузом t_1 на конвейере по формуле (15) для определения максимального ускорения груза по выражению (16) и уточняется значение крутящего момента по формуле (2):

$$t_1 = \frac{2\pi}{\omega} - \frac{\sqrt{\left(\frac{m_m}{m_m + m_k} \right)^2 g^2 \delta_m^2 + 4A\omega^2 \pi g \delta_m \frac{m_m}{m_m + m_k} \left(1 - \frac{m_k}{m_m + m_k} \right) - \frac{m_m}{m_m + m_k} g \delta_m}}{A\omega^3 \left(1 - \frac{m_k}{m_m + m_k} \right)}. \quad (15)$$

Максимальное ускорение груза определяется по формуле

$$a_m = \ddot{x}_m^{mn} = -A\omega^2 \sin \omega t \left(1 - \frac{m_k}{m_m + m_k} \right) + \frac{m_m}{m_m + m_k} g\delta_m. \quad (16)$$

Определение мощности конвейера проводится с учетом количества конвейеров, работающих от одного привода:

$$N_{np} = c \sqrt{\frac{N_{nx}^2 \cdot (t_1 - T/2) + N_{ox}^2 \cdot T/2 + N_{cd}^2 \cdot (T - t_1)}{T}}. \quad (17)$$

где N_{nx} – мощность привода конвейера при прямом ходе рамы:

$$N_{nx} = \left[m_{zp} \left(\frac{\int_0^{T/4} \ddot{x}_m^{mn} dt}{T/4} + g\delta_m \right) + m_k \left(\frac{\int_0^{T/4} -A\omega^2 \sin \omega t dt}{T/4} + g\delta_k \right) \right] \frac{\int_0^{T/4} A\omega \cos \omega t dt}{T/4} + \left[m_{zp} \left(\frac{\int_{3T/4}^{t_1} \ddot{x}_m^{mn} dt}{t_1 - 3T/4} + g\delta_{zp} \right) + m_k \left(\frac{\int_{3T/4}^{t_1} -A\omega^2 \sin \omega t dt}{t_1 - 3T/4} + g\delta_k \right) \right] \frac{\int_{3T/4}^{t_1} A\omega \cos \omega t dt}{t_1 - 3T/4}; \quad (18)$$

N_{ox} – мощность привода конвейера при обратном ходе рамы:

$$N_{ox} = \left[m_{zp} \left(\frac{\int_{T/4}^{3T/4} \ddot{x}_m^{mn} dt}{T/2} + g\delta_m \right) - m_k \left(\frac{\int_{T/4}^{3T/4} -A\omega^2 \sin \omega t dt}{T/2} - g\delta_k \right) \right] \frac{\int_{T/4}^{3T/4} A\omega \cos \omega t dt}{T/2}; \quad (19)$$

N_{cd} – мощность привода, затрачиваемая при совместном движении рамы и гружёных тележек:

$$N_{cd} = \left[(m_m + m_k) \left(\frac{\int_{t_1}^T -A\omega^2 \sin \omega t dt}{T - t_1} + g\delta_k \right) \right] \frac{\int_{t_1}^T A\omega \cos \omega t dt}{T - t_1}. \quad (20)$$

Далее подбирается электродвигатель и обязательно проводится проверка на нагрев по типовым методикам.

Современное развитие производства основано на базе комплексной механизации и автоматизации погрузочно-разгрузочных и транспортных операций с использованием конвейеров, что позволяет значительно повысить производительность труда и снизить себестоимость выпускаемой продукции. Одним из направлений в развитии машин непрерывного транспорта является создание конвейеров для бесперегрузочного транспортирования грузов

от начального до конечного пункта как по прямолинейным, так и по сложным пространственным трассам.

Рассмотренная методика инженерного расчёта может быть внедрена в производство транспортно-технологических конвейеров, позволяющих обслуживать производственный цикл по заданной программе, и может конкурировать с традиционными видами заводского транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лускань О.А. Конвейер для перемещения изделий на тележках-спутниках в гибких производственных системах / Н.Е. Ромакин, О.А. Лускань // Автоматизация и современные технологии. М.: Машиностроение, 2003. №5. С. 111-115.

2. Ромакин Н.Е. Машины непрерывного транспорта: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н.Е. Ромакин. М.: Изд. центр «Академия», 2008. 432 с.

Лускань Олег Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъёмно-транспортные, строительные и дорожные машины» Балаковского института техники, технологии и управления (филиала) Саратовского государственного технического университета

Luskan' Oleg Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of «Hoisting-and-transport, building and road cars» of Balakovo Institute of Engineering, Technology and Management (branch) of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.735

В.А. Мелентьев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ КОМБИНИРОВАННОГО ДОРНОВАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК

Рассматривается способ определения потребной силы для осуществления комбинированного дорнования кольцевых металлических заготовок. Проводится сравнение расчетных усилий дорнования с экспериментальными.

Кольцевые заготовки, деформация, усилие, дорнование

V.A. Melentev

DETERMINATION EFFORT MULTIFUNCTION BURNISHING CIRCULAR PART BLANK

The way of the determination of necessary power is considered for realization multifunction burnishing metallic circular part blank. It is conducted comparison accounting effort burnishing with experimental.

Circular part blank, deformation, effort, burnishing

При разработке технологии обработки кольцевых заготовок давлением большое значение имеет определение величины усилия, необходимого для осуществления деформации.

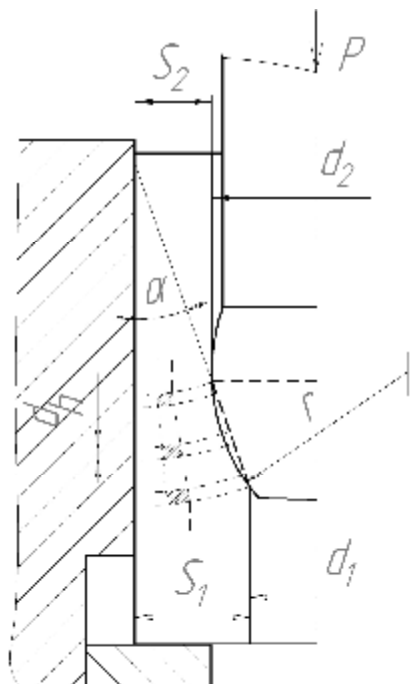


Рис. 1. Расчетная схема деформации

В частности, при обработке заготовок методом комбинированного дорнования предварительный расчет усилий позволяет правильно подобрать оборудование, оснастку и схему обработки. Но определение потребной силы на пуансоне для осуществления комбинированного дорнования представляется сложной задачей, требующей учета множества факторов. Поэтому в практических целях целесообразнее упростить эту задачу, приняв следующие допущения [4]:

1) Рассматривается только случай плоского деформированного состояния. Деформации в тангенциальном направлении незначительны.

2) Принято, что плоские изначально сечения остаются плоскими в течение всего процесса деформирования.

3) Считается, что аксиальные напряжения в элементарном объеме заготовки распределены равномерно по всей площадке, на которую они действуют в данный момент.

4) Работа тягового усилия дорна зависит от его профиля. С возрастанием конусности профиля дорна работа тягового усилия уменьшается. Происходит это за счет снижения работы на входе и на выходе дорна и за счет снижения работы сил трения.

Потребную силу дорнования можно определить умножением осевого напряжения на площадь кольцевого сечения заготовки [1, 2], либо разделив работу усилия дорна на элементарное осевое перемещение дорна dh (рис. 1), с учетом рекомендаций А.В. Королева [3]:

$$P_d = S_s \cdot s_1 \times \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{s_1}{s_2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{s_1 - s_2}{r}} + \left(1 + \frac{1}{2} \ln \frac{s_1}{s_2}\right) \cdot \ln \frac{s_1}{s_2} + \frac{1}{2} \cdot m \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{s_1 - s_2}{r}} \cdot \ln \frac{s_1}{s_2} \right], \quad (1)$$

где S_s – предел текучести материала заготовки с учетом упрочнения, Па; r – радиус профиля дорна, м; s_1 и s_2 – начальная и конечная толщина стенки заготовки, м; m – коэффициент трения скольжения дорна по заготовке.

Для определения напряжения в обработанной стенке кольца S_z необходимо учесть упрочнение металла [5] следующей подстановкой:

$$S_s = S_{cp} = \frac{(S_1 + S_2)}{2}, \quad (2)$$

где S_1 и S_2 – напряжения текучести металла на входе и на выходе дорна, Па.

Тогда искомое напряжение:

$$S_z = S_{cp} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{s_1 - s_2}{r}} \cdot \left(1 + m \cdot \ln \frac{s_1}{s_2}\right) + \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}} + \frac{1}{2} \ln \frac{s_1}{s_2}\right) \cdot \ln \frac{s_1}{s_2} \right]. \quad (3)$$

Экспериментальные исследования [5] показали, что при увеличении угла сдвига α в зависимости от условий трения [3] и величины сдвиговых деформаций в поверхностном слое металла перед дорном образуется волнообразный «наплыв», который увеличивает очаг де-

формации. Металл начинает выдавливаться из пластической зоны, а кольцевая пластическая волна движется впереди дорна, увеличивая ширину поверхности контакта. В результате усилие перемещения дорна также возрастает.

В случае комбинированного дорнования инструментом со сферической или торовой рабочей поверхностью радиусу рабочей части дорна r можно сопоставить определенное значение угла α , зависящего от глубины воздействия рабочей поверхности дорна на обрабатываемую поверхность.

На рис. 2 показаны теоретические и экспериментальные зависимости тягового усилия дорна P_0 от угла α . Сплошными линиями показаны аналитические зависимости, полученные с использованием формулы (1) при помощи программного продукта Mathcad 14. Штриховой линией показаны кривые, построенные на основании экспериментальных данных из [5]. Кривые на рис. 2а получены при натяге дорнования в 1 мм, а кривые на рис. 2,б – при натяге дорнования в 2 мм.

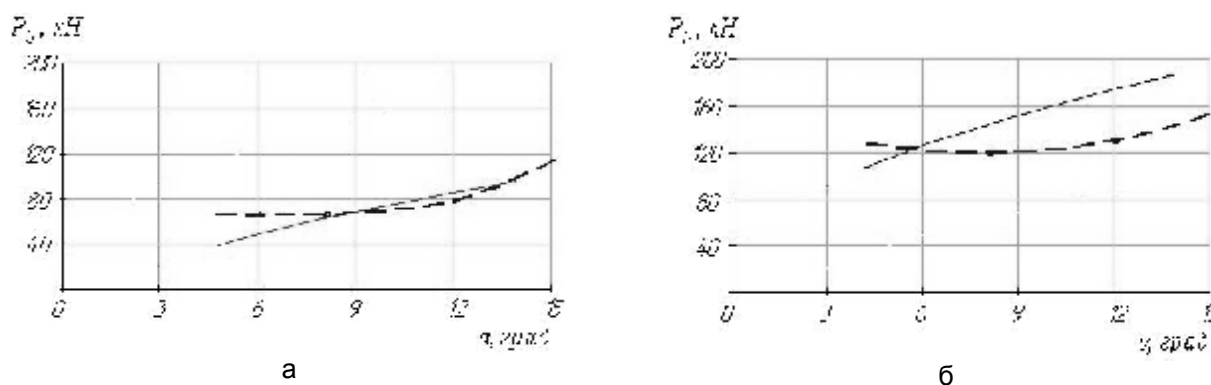


Рис. 2. Зависимость усилия дорнования P_0 от угла α контакта дорна с заготовкой при различных натягах дорнования

В ходе этих исследований было установлено, что величина наплыва заметно возрастает при $\alpha > 12^\circ$ и практически не зависит от натяга.

При $\alpha > 12^\circ$ с увеличением наплыва ухудшается доступ смазки в очаг деформации, поэтому коэффициент трения увеличивается относительно расчетного. При углах α менее 4° экспериментальные значения усилий превышают расчетные более чем на 50%, что, видимо, связано с увеличением площади контакта дорна с заготовкой и увеличением трения удлиняющейся части заготовки по матрице. На рис. 2 б теоретические значения на 25...30% превышают экспериментальные при $\alpha > 9^\circ$. Это говорит о том, что коэффициент трения значительно колеблется при изменении условий смазки в очаге деформации.

Таким образом, можно сказать, что описанная методика может быть использована при анализе комбинированного дорнования в пределах колебания угла контакта дорна с заготовкой в пределах от 4 до 12 град., что соответствует реальным условиям осуществления комбинированного дорнования. Полученные зависимости позволили выяснить характер влияния основных факторов на усилие дорнования. Эти зависимости с определенной погрешностью соответствует экспериментальным [1], что свидетельствует о приемлемости изложенной методики анализа. Однако стремление максимально упростить аналитическое решение привело к необходимости использования ряда допущений, что неизбежно сказалось на точности расчетных значений, получаемых по приведенным формулам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев А.В. Исследование технологии бокового выдавливания при изготовлении колец / А.В. Королев, В.А. Мелентьев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. №2 (24). Вып. 1. С. 41-45.
2. Королев А.В. Расчет усилий деформации при обработке металлических кольцевых заготовок в холодном состоянии / А.В. Королев, В.А. Мелентьев, А.А. Никифоров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2008. №4 (36). С. 36-39.
3. Королев А.В. Специфика процесса комбинированного дорнования кольцевых деталей с утолщением / А.В. Королев, В.А. Мелентьев // Исследования сложных технологических систем: сб. науч. тр. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2008. С. 60-62.
4. Штамповка кольцевых заготовок / Д.С. Львов, Ю.Л. Рождественский, А.В. Абрамов, Л.К. Литвак. М.: Гостехиздат, 1958. 182 с.
5. Монченко В.П. Эффективная технология производства полых цилиндров / В.П. Монченко. М.: Машиностроение, 1980. 248 с.

Мелентьев Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Melentyev Vladimir Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of «Designing technical and technological complex» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 20.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.7:658.12

С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарёв

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассматривается модель подсистемы проектирования технологических операций фрезерной обработки. Представлены методики формирования рациональных комплексов режущего инструмента и генерации возможных последовательностей обработки при проектировании операций фрезерной обработки в системе планирования многономенклатурных технологических процессов.

Автоматизация проектирования, фрезерная обработка, многономенклатурное производство

S.G. Mitin, P.Yu. Bochkarev

AUTOMATION OF DESIGNING OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS OF MILLING PROCESSING IN THE CONDITIONS OF MULTINOMENCLATURE MANUFACTURING

The model of a designing subsystem of technological operations of milling processing is considered. The technique of formation of rational complete sets of the cutting tool and a technique

of generation of possible sequences of processing are presented at designing of operations of milling processing in system of planning of multinomenclature technological processes.

CAD/CAM, milling processing, multinomenclature manufacturing

На современном этапе развития машиностроительного производства эффективность работы предприятий напрямую зависит от их гибкости в плане постоянного изменения номенклатуры изготавливаемых изделий в соответствии с потребностями рынка. При многономенклатурном характере производства на первый план выходит задача сокращения сроков технологической подготовки производства, которая может быть решена только путём автоматизации различных этапов проектирования технологических процессов. Применение существующих автоматизированных систем технологической подготовки производства является недостаточно эффективным в условиях многономенклатурного производства, так как реализованные в этих системах методики не позволяют учитывать конструкторско-технологические особенности номенклатуры изделий и оперативно реагировать на изменяющуюся производственную ситуацию. В связи с этим одним из основных направлений технологии машиностроения как науки является задача создания новых методик проектирования технологических операций механической обработки деталей с целью более глубокой формализации проектных действий и учёта особенностей конкретной производственной системы. В наибольшей степени поставленные выше задачи нашли свое решение в системе планирования многономенклатурных технологических процессов [1-3].

Теоретические основы разработки технологических операций изложены в [1, 2], где предлагается общая последовательность проектирования операционных технологических процессов в условиях многономенклатурного производства. В соответствии с этой последовательностью разработана модель автоматизированной подсистемы проектирования технологических операций фрезерной обработки, позволяющая отразить последовательность проектирования и информационные связи между этапами проектирования (рис. 1).

Подсистема проектирования технологических операций фрезерной обработки состоит из трёх блоков: выбор средств технологического оснащения, выбор структур технологических операций и разработка технологических переходов. Общие исходные данные для каждого блока находятся в базах данных: по технологическим возможностям оборудования, технологической оснастки, деталей и заготовок, ранее принятых технических решений. Каждый блок состоит из трёх модулей: генерация возможных вариантов, отсев вариантов, выбор рациональных вариантов. После этапов генерации возможных вариантов данные сохраняются в соответствующих фрагментах базы данных технологических операций для оборудования фрезерной группы, откуда впоследствии могут быть оперативно получены при изменении производственной ситуации.

Рациональные варианты, сформированные на каждом предшествующем блоке, поступают на вход каждого последующего блока. После окончания работы второго и третьего блоков производится проверка возможности реализации операции с данными вариантами технологической оснастки, структур операций и режимами обработки. Если в сложившихся производственных условиях реализация невозможна, то проектирование операции возвращается к предыдущему блоку с указанием вновь возникших ограничений.

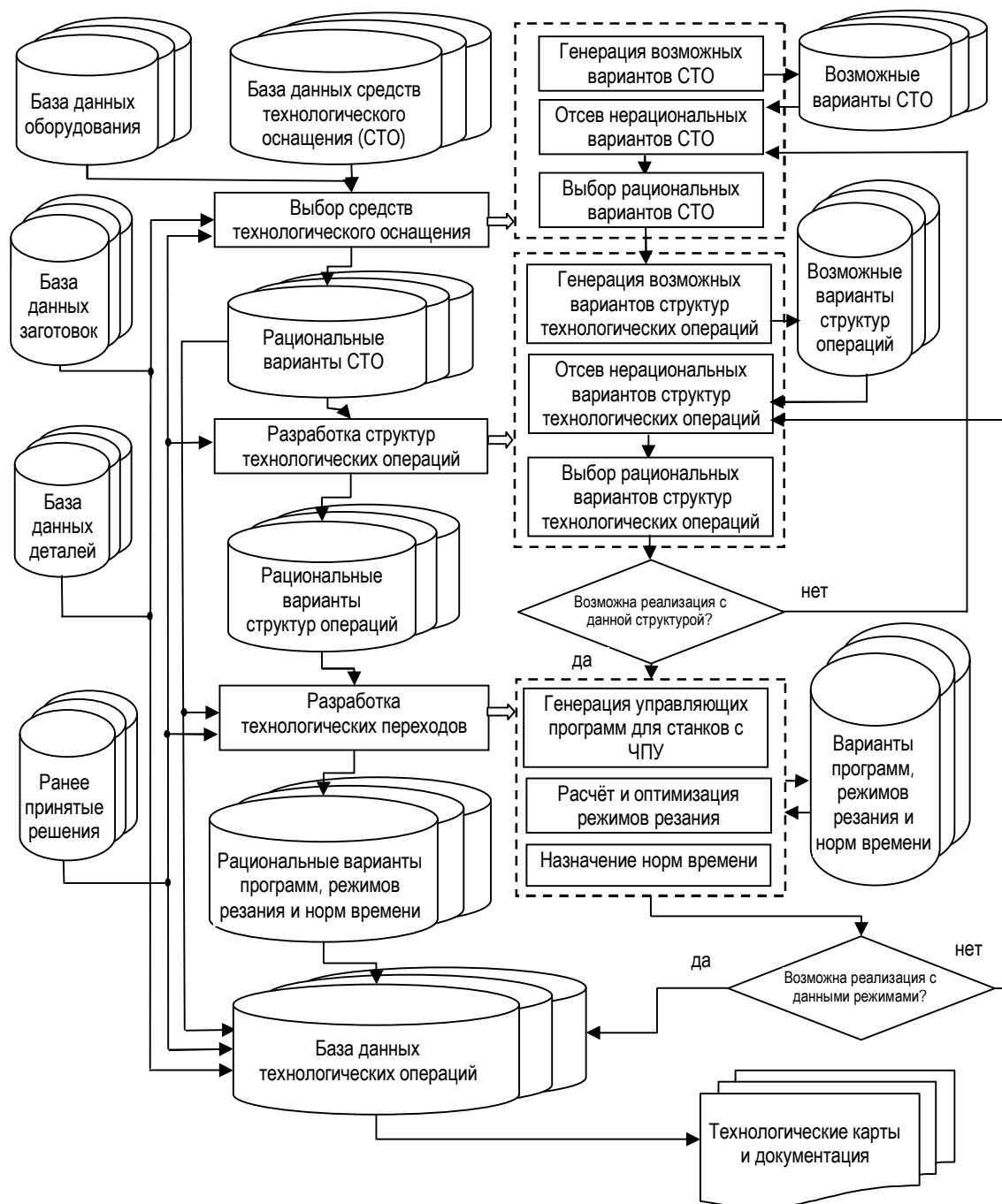


Рис. 1. Модель подсистемы проектирования технологических операций фрезерной обработки

Разработанные варианты операций сохраняются в соответствующей базе данных, и формируется комплект технологической документации в виде операционных карт, карт эскизов и другой необходимой документации. Выбор возможных вариантов технологической оснастки для оборудования фрезерной группы производится на основе базы данных технологической оснастки, структура которой позволяет реализовать методику генерации возможных вариантов оснастки в автоматическом режиме.

Генерация возможных вариантов режущего инструмента представляет собой перебор множества типоразмеров режущего инструмента и установление возможности их применения на каждом переходе. Ввиду большого числа вариантов перебора генерация возможных вариантов режущего инструмента должна происходить поэтапно. На первых этапах установ-

ливаются такие параметры, которые позволяют отсекать из всего множества режущего инструмента как можно большее количество различных типоразмеров режущего инструмента. В результате разработана следующая последовательность генерации возможных вариантов режущего инструмента: выбор по группе оборудования, выбор по присоединительным параметрам инструмента и станка, выбор с учётом твёрдости обрабатываемой поверхности, с учётом материала обработки, выбор в соответствии с типом элементарной поверхности, выбор с учётом точности обработки и выбор в соответствии с размерами обрабатываемой поверхности [4].

Задача выбора из сформированных вариантов технологической оснастки рациональной номенклатуры технологической оснастки для каждого вида оборудования, используемого в производственной системе, на основе известных методов требует больших затрат времени, так как предусматривает полный перебор всех возможных вариантов с расчётом для каждого варианта трудоёмкости наладки и основного времени обработки. В связи с этим предлагается решать эту задачу в два этапа: отсев нерациональных вариантов и формирование рационального комплекта технологической оснастки.

Наиболее эффективным для решения задачи отсева нерациональных вариантов оснастки видится применение критерия однородности технологической оснастки и инструмента, который обеспечивает инвариантность структур операций и позволяет выполнить требование взаимозаменяемости различных элементов технологических операций.

Выбор рационального комплекта режущего инструмента для всей совокупности технологических переходов может быть осуществлён путём перебора различных вариантов режущего инструмента, поступивших после этапа отсева нерациональных вариантов, с расчётом основного времени для каждого варианта. В связи с тем, что таких комбинаций может быть достаточно много, и для их перебора потребуются слишком большие вычислительные ресурсы, необходимо разработать математическую модель, которая позволит сократить объём вычислений и временные затраты на реализацию данной проектной процедуры.

Представим совокупность всех разрабатываемых технологических операций как систему, элементами которой являются отдельные технологические переходы. Обозначим множество технологических переходов $P = \{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n\}$, где n – количество различных технологических переходов для всех технологических операций, а множество возможных вариантов режущего инструмента $R = \{R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_m\}$, где m – количество различных типоразмеров режущих инструментов. Требуется для каждого технологического перехода P_i подобрать вариант режущего инструмента R_j , чтобы сформированный комплект режущего инструмента был наиболее рациональным для складывающихся производственных условий.

Сформулируем задачу выбора рациональных вариантов режущего инструмента в терминах динамического программирования. Процедура выбора рациональных вариантов режущих инструментов представляет собой некоторую *операцию*, состоящую из ряда последовательных этапов или шагов. В нашем случае каждый шаг – это отдельный технологический переход.

Пусть шаговые управления $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ – решения по выбору какого-либо типоразмера режущего инструмента для обработки на i -м шаге (технологическом переходе), где $i = 1..n$; n – количество технологических переходов. При этом выигрыш при i -м шаговом управлении равен w_i . Управление *операцией* x – совокупность шаговых управлений. $x = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$.

Требуется найти такое управление x^* , при котором суммарный выигрыш W обращается в максимум:

$$W = \sum_{i=1}^n w_i \rightarrow \max. \quad (1)$$

При этом $x^* = \{x^*_1, x^*_2, \dots, x^*_i, \dots, x^*_n\}$ – оптимальное управление, состоящее из совокупности оптимальных шаговых управлений.

Определим параметры, которые характеризуют состояние системы перед каждым шагом и критерий оптимизации.

От выбора того или иного варианта режущего инструмента зависят режимы резания, на основе которых рассчитывается основное время t_0 , поэтому в качестве критерия оптимизации выбираем суммарное основное время $t_{0\Sigma}$, которое определяется суммой основных времён каждого технологического перехода для всех рассматриваемых технологических операций. Требуется подобрать такие комбинации режущего инструмента для каждого технологического перехода, чтобы суммарное время $t_{0\Sigma}$ было минимальным. Если стремиться минимизировать только t_0 , то в рамках одной и той же технологической операции может потребоваться смена режущего инструмента, что повлечёт за собой дополнительные затраты времени, сопоставимые с основным временем. В связи с этим ещё одним критерием оптимизации технологической операции является количество смен режущего инструмента, которое должно быть сведено к минимуму.

В условиях многономенклатурного производства, когда размеры партий изготавливаемых деталей невелики, а номенклатура деталей, напротив, довольно широка, потери времени на переустановку режущего инструмента во время переналадки на следующую технологическую операцию, выполняемую на том же станке, что и предыдущая, могут быть достаточно большими. Поэтому необходимо стремиться к сокращению количества смен инструмента в рамках не только одной технологической операции, но и обработки технологических переходов, входящих в различные технологические операции, но выполняемые на одном и том же технологическом оборудовании.

Одним из важнейших технологических параметров режущего инструмента является его стойкость. Время бессменной работы t_{0j} для j -го режущего инструмента ограничивается нормативным периодом стойкости T_j .

$$t_{0j} = \sum_{r=1}^p (t_{0j})_r \cdot N_r \leq T_j, \quad (2)$$

где p – количество различных деталей, для обработки которых используется j -й инструмент; N_r – размер партии r -й детали.

Управление $x_i = \{j, t_{ij}, a_{ij}\}$ на i -м шаге означает, что на данном технологическом переходе обработка ведётся с помощью j -го типоразмера режущего инструмента с временем обработки t_{ij} , с количеством смен инструмента a_{ij} .

$$a_{ij} = \left\lceil \frac{t_{ij}}{T_j} \right\rceil - 1, \quad (3)$$

где τ_{ij} – суммарное время бессменной работы j -го режущего инструмента после обработки на i -м переходе; обозначение $\lceil \cdot \rceil$ – ближайшее большее целое число.

$$t_{ij} = t_{(i-1)j} + t_{ij} \cdot N_r. \quad (4)$$

Состояние системы на каждом i -м шаге характеризуется вектором $S_i = \{j, \tau_{ij}\}$, который означает, что перед выполнением i -го перехода использовался j -й типоразмер режущего инструмента, и его использованный ресурс равен τ_{ij} .

Запишем функцию выигрыша для каждого шага

$$w_i = f_i(S_i, x_i). \quad (5)$$

Определим функцию изменения состояния системы

$$S' = j_i(S_i, x_i), \quad (6)$$

которая показывает, как меняется состояние S_i под влиянием управления x_i .

Тогда имеем возможность записать основное рекуррентное уравнение динамического программирования

$$W_i(S_i) = \max_{x_i} \{f_i(S_i, x_i) + W_{i+1}(j_i(S_i, x_i))\}, \quad (7)$$

которое выражает условный оптимальный выигрыш $W_i(S_i)$ (начиная с i -го шага и до конца) через уже известную функцию $W_{i+1}(S')$. Этому выигрышу соответствует условное оптимальное управление на i -м шаге $x_i(S_i)$.

Решение задачи начинается с проведения условной оптимизации последнего n -го шага, вычисляя для возможных вариантов режущего инструмента на этом шаге условный оптимальный выигрыш

$$W_n(S_n) = \max_{x_n} \{f_n(S_n, x_n)\}, \quad (8)$$

и находя условное оптимальное управление $x_n(S_n)$.

В нашем случае в качестве последнего шага определяется технологический переход, на котором может быть использовано наименьшее количество различных наименований и типоразмеров режущего инструмента, так как в противном случае не гарантируется выполнение данного перехода ввиду существующей вероятности исключения подходящих режущего инструмента на предшествующих шагах.

Далее проводится условная оптимизация $(n-1)$ -го, $(n-2)$ -го и т. д. шагов по формуле (7). В итоге остаётся произвести безусловную оптимизацию управления, учитывая полученные рекомендации на каждом шаге.

Следующим этапом проектирования технологической операции является разработка рациональной структуры операции. На выбор структуры технологической операции в конкретных условиях производства влияет множество факторов: геометрическая конфигурация детали, требуемая точность обработки, качество получаемой поверхности, технологические возможности оборудования, приспособлений, режущего инструмента и т. д. Изменение структуры операции оказывает значительное влияние на станкоёмкость и трудоёмкость обработки. Следовательно, выбор рациональной структуры операции при планировании технологических процессов на уровне технологических операций является ключевым моментом для повышения показателя технико-экономической эффективности технологических процессов.

Задача проектирования структур технологических операций является комплексной, состоящей из нескольких этапов. Ключевым этапом является выбор рациональной последовательности технологических переходов для каждой операции, который начинается с этапа генерации возможных последовательностей обработки.

Исходными данными для генерации возможных последовательностей обработки в системе планирования многономенклатурных технологических процессов является множество кортежей технологических переходов $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$, где n – количество кортежей. Каждый кортеж можно представить в виде неупорядоченного множества $K_i = \{K_{i1}, K_{i2}, \dots, K_{im}\}$, где $i = 1..n$, m – количество переходов в i -м кортеже. Каждый элемент множества K_i представляет собой множество характеристик отдельного перехода, одной из которых является код элементарной обрабатываемой поверхности. Для определения возможных последовательностей переходов внутри каждой отдельной операции необходимо в первую очередь упорядочить множества K_i .

Обозначим $S = \{S_1, S_2, \dots, S_j, S_{j+1}, \dots, S_{p-1}, S_p\}$ – множество различных элементарных поверхностей деталей, где $j = 1..p$; p – количество элементарных поверхностей. Рассмотрим все возможные сочетания двух элементарных поверхностей без учёта порядка обработки: $S_1 - S_2, \dots, S_1 - S_j, S_1 - S_{j+1}, \dots, S_1 - S_{p-1}, S_1 - S_p, \dots, S_2 - S_j, S_2 - S_{j+1}, \dots, S_2 - S_{p-1}, S_2 - S_p, \dots, S_j - S_{j+1}, \dots, S_j - S_{p-1}, S_j$

– $S_p, S_{j+1} - S_{p-1}, S_{j+1} - S_p, S_{p-1} - S_p$. В связи с тем, что в одном кортеже может быть несколько элементарных поверхностей одного типа, имеют место и следующие пары: $S_1^1 - S_1^2, S_2^1 - S_2^2, S_j^1 - S_j^2, S_{j+1}^1 - S_{j+1}^2, S_{p-1}^1 - S_{p-1}^2, S_p^1 - S_p^2$. Далее необходимо установить возможные последовательности обработки рассматриваемых пар поверхностей в соответствии с накопленным технологическим опытом и рекомендациями к проектированию технологических операций.

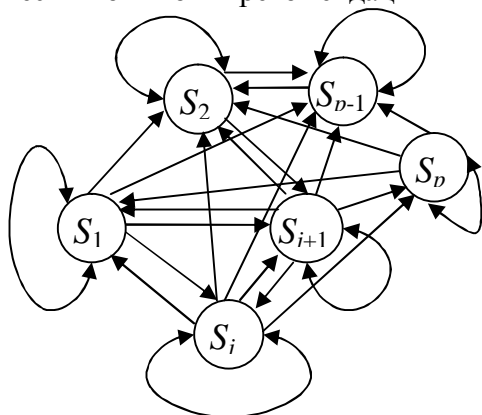


Рис. 2. Граф возможных последовательностей обработки элементарных поверхностей

Если в кортеже технологических переходов имеются три и более элементарных поверхностей, то необходимо составить множества возможных последовательностей обработки для трёх и более поверхностей. Число вариантов последовательностей стремительно возрастает с увеличением количества поверхностей в кортеже. В связи с этим для удобства представления и обработки информации воспользуемся математическим аппаратом теории графов. Каждой вершине графа (рис. 2) присваивается код элементарной поверхности. Каждая дуга между двумя вершинами выражает последовательность обработки, а именно: вершина с исходящей дугой определяет код поверхности, которая должна обрабатываться раньше по отношению к поверхности, указанной в вершине, на которую заходит дуга.

Если нет принципиальной разницы в последовательности обработки каких-либо двух поверхностей, то две вершины графа с данными поверхностями будут соединяться двумя противоположно направленными дугами. Последовательность обработки двух однотипных элементарных поверхностей обозначим в виде петли у соответствующей вершины графа.

После объединения данных пар вершин в граф $G=(V, E)$, где $V=\{S_1, S_2, \dots, S_j, S_{j+1}, \dots, S_{p-1}, S_p\}$ – множество вершин, эквивалентное множеству S ; $E=\{(S_1, S_2), (S_1, S_j), (S_j, S_1), (S_1, S_{j+1}), (S_{j+1}, S_1), (S_1, S_{p-1}), (S_p, S_1), (S_j, S_2), (S_2, S_{j+1}), (S_{j+1}, S_2), (S_2, S_{p-1}), (S_{p-1}, S_2), (S_p, S_2), (S_j, S_{j+1}), (S_{j+1}, S_j), (S_j, S_{p-1}), (S_j, S_p), (S_{j+1}, S_{p-1}), (S_{j+1}, S_p), (S_p, S_{p-1}), (S_1^1, S_1^2), (S_2^1, S_2^2), (S_j^1, S_j^2), (S_{j+1}^1, S_{j+1}^2), (S_{p-1}^1, S_{p-1}^2), (S_p^1, S_p^2)\}$ – множество ориентированных рёбер, получаем модель, отражающую последовательности обработки элементарных поверхностей.

Для определения возможной последовательности обработки i -го кортежа, состоящего из m переходов, из графа G выбирается подграф, вершины которого соответствуют обрабатываемым поверхностям в кортеже. Затем непосредственно определяется последовательность обработки путём обхода вершин по стрелке с соблюдением следующих условий:

1) каждая вершина должна включаться в маршрут столько раз, сколько раз встречается в кортеже технологических переходов элементарная поверхность, соответствующая данной вершине;

2) для каждой вершины S_j , где $j=2..m$, не должно быть исходящей дуги в направлении каждой из предыдущих вершин S_k , где $k=1..(j-1)$, либо между этими вершинами должны быть противоположно ориентированные дуги.

После выбора возможных вариантов последовательностей переходов для каждого кортежа технологических переходов имеем семейство упорядоченных множеств K' . Каждое множество в семействе K' представляет собой возможный вариант структуры технологической операции. Если существует несколько возможных последовательностей обработки для одного и того же кортежа переходов, то на следующих этапах проектирования структур технологических операций необходимо произвести отсев нерациональных и выбор наиболее эффективных вариантов последовательностей обработки [5].

Отсев нерациональных вариантов последовательностей переходов в первую очередь производится по степени точности обработки, а затем по относительному расположению обрабатываемых поверхностей. Выбор рациональных вариантов последовательностей переходов осуществляется по критерию минимизации штучно-калькуляционного времени операции.

Расчёт режимов резания и нормирование технологических операций производятся по известной методике для каждого варианта технологической операции. В результате из всех вариантов операций выбирается операция с минимальным штучно-калькуляционным временем, для которой генерируется технологическая документация.

Таким образом, разработанные методики позволяют формализовать наиболее трудоёмкие этапы проектирования технологических операций фрезерной обработки и на их основе создать алгоритмы и программные процедуры, полностью автоматизирующие процесс проектирования, что существенно сократит время проектирования технологических операций и повысит качество проектных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарёв П.Ю. Основные принципы разработки операций в системе планирования технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарёв, В.А. Назарьева // СТИН. 2006. № 10. С. 2-6.
2. Бочкарёв П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарёв // Технология машиностроения. 2002. № 1. С. 10-14.
3. Бочкарёв П.Ю. Планирование технологических процессов в условиях многономенклатурных механообрабатывающих систем. Теоретические основы разработки подсистем планирования маршрутов технологических операций: учеб. пособие / П.Ю. Бочкарёв, А.Н. Васин. Саратов: СГТУ, 2004. 136 с.
4. Митин С.Г. Генерация и отсев вариантов технологической оснастки при автоматизированном проектировании операций для оборудования фрезерной группы / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарёв // Вестник СГТУ. 2009. №2 (39). С. 25-31.
5. Митин С.Г. Подсистема проектирования рациональной структуры технологических операций для оборудования фрезерной группы / С.Г. Митин // Вестник СГТУ. 2009. №3 (41). С. 141-144.

Митин Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Бочкарёв Пётр Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Mitin Sergey Gennadyevich – Candidate of Technical Sciences of the Department of «Technical and Technological systems Design» of Saratov State Technical University

Bochkarev Pyotr Yuryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Technical and Technological systems Design» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 20.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.793.:621.787

И.В. Пряхин, О.Ю. Давиденко

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПУТЕМ
НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ ВТИРАНИЕМ
В ПРОЦЕССЕ ИХ СОВМЕСТНОЙ ДОРАБОТКИ В СОБРАННОМ ВИДЕ**

Раскрыта сущность метода повышения работоспособности подшипников качения путем нанесения покрытия на рабочие поверхности втиранием в процессе их совместной доработки в собранном виде. Приведены результаты компьютерного моделирования кинематики процесса, результаты теоретических исследований, математические модели процесса.

Подшипник качения, рабочая поверхность покрытия

I.V. Pryahin, O.Y. Davidenko

**IMPROVING THE EFFICIENCY BEARINGS BY THE PLATING ON THE WORKING
SURFACES BY RUBBING IN THEIR JOINT FINALIZATION IN BODILY**

Discloses the essence of the method of improving performance of rolling bearings by the plating on the working surfaces by rubbing in their joint finalization in bodily. The results of computer simulation of the kinematics of the process, the results of theoretical studies, mathematical models of the process.

Bearing of swing, working surface of covering

Подшипники качения являются ресурсопределяющими узлами в большинстве механизмов и машин. До 80% отказа машин связано с выходом из строя рабочих поверхностей этих узлов [1]. Этим обусловлено предъявление высоких требований к качеству поверхностей подшипников в современной промышленности.

Состояния рабочих поверхностей подшипников качения формируются на финишных операциях технологических процессов. Для улучшения трибологических свойств дорожек качения применяют операции суперфиниширования, обработку поверхностной пластической деформацией, нанесение износостойких и антифрикционных покрытий. Для увеличения долговечности работы подшипников требуется использовать комбинированные методы обработки, сочетающие в себе преимущества различных методов, в том числе модификацию поверхности и нанесение покрытий.

Одним из таких методов является нанесение покрытий на рабочие поверхности их деталей втиранием в собранном виде. Сущность метода заключается в создании рабочего натяга в зоне контакта деталей посредством перекося осей вращения внутреннего и наружного колец и придании кольцам вращательного движения во встречном или попутном направлениях (рис. 1 а). В результате этого в области контакта рабочих поверхностей тел качения и колец возникает проскальзывание, а также интенсивная пластическая деформация микронеровностей. При этом происходят удаление оксидных пленок и обнажение чистых поверхностей [2]. Если в зону контакта поместить материал покрытия, то создаются благоприятные технологические условия для нанесения на дорожки качения колец и тел качения износостойкого или любого другого покрытия втиранием.

В результате доработки роликоподшипников данным методом величина проскальзывания в различных точках профиля рабочих поверхностей колец и тел качения будет различной, что приведет к неодинаковому износу микронеровностей и различной толщине наносимого покрытия на отдельных участках профиля деталей. Минимальная величина проскальзывания будет наблюдаться в центральной части профиля (рис. 1 б). По мере движения пятна контакта к краевым участкам величина проскальзывания будет возрастать и достигать максимального значения в самой крайней точке профиля. При этом на рабочих поверхностях дорожек и тел качения подшипника будет формироваться выпуклый профиль, что приведет к повышению эксплуатационных свойств подшипника.

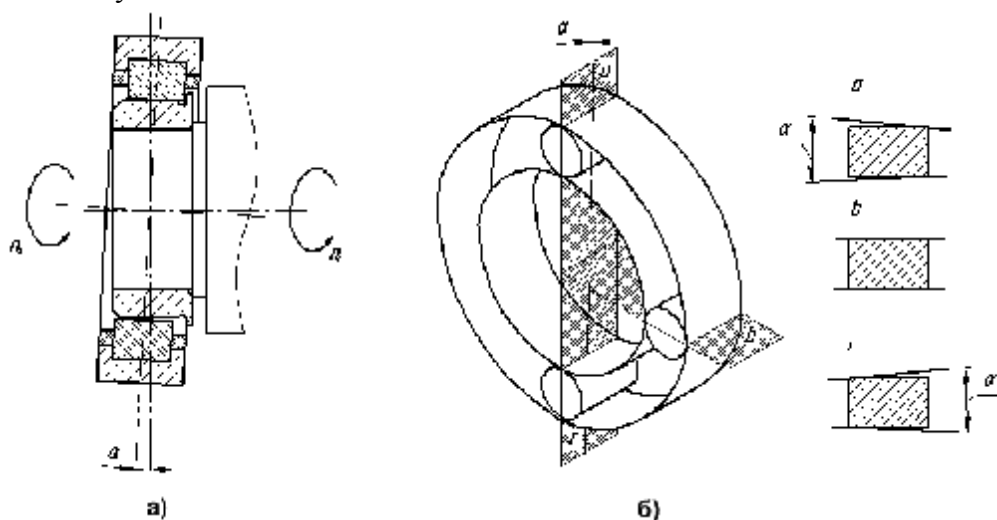


Рис. 1. Схема перекаса осей вращения колец обрабатываемого подшипника:
 а) принципиальная схема обработки;
 б) положение площадки контакта при разных позициях тела качения

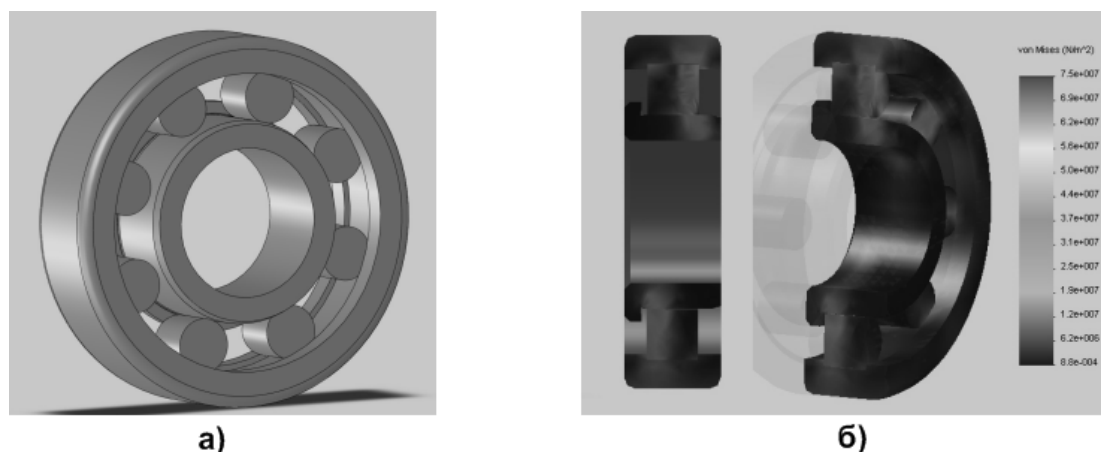


Рис. 2. Компьютерное моделирование процесса нанесения покрытия:
 а) трехмерная модель подшипника 42305; б) распределение напряжений в зоне контакта

Анализ кинематики процесса и закономерности перемещения площадки контакта производился с помощью компьютерного моделирования в среде SolidWorks на кафедре ТМС СГТУ. Была создана 3D модель объекта исследования – роликового радиального подшипника с короткими цилиндрическими роликами 42305 ГОСТ 8328-75 (рис. 2 а). Кроме исследования перемещения площадки контакта, с помощью компьютерного моделирования были исследованы закономерности распределения напряжений в зоне контакта (рис. 2 б). Выявленный сложный характер распределения напряжений обосновал правильность выбора режимных факторов исследования. Так, наряду с вращением наружного кольца в процессе нанесения по-

крытия необходимо вращать и внутреннее, поскольку в разных полуплоскостях осевого сечения его рабочие поверхности испытывают напряжения на противоположных краях.

Формообразование поверхности происходит, главным образом, благодаря пластическим деформациям микронеровностей, возникающим в зоне обработки. Начиная с краев рабочих поверхностей, формируется окончательная их геометрия. Вследствие пластической деформации рабочая поверхность колец приобретает рациональную геометрическую форму с симметричной выпуклостью. Тела качения приобретают также бочкообразную форму. В процессе обработки предварительный натяг будет уменьшаться за счет изменения геометрии контактирующих поверхностей. Когда профиль рабочих поверхностей приобретёт заданную форму, натяг в системе станет равным нулю.

В ходе теоретических исследований была получена математическая модель толщины наносимого покрытия:

$$h = \frac{2a \left(P^2 \sqrt{(\pi a^2 P_{cp})^4 \left(1 + \lambda^{\frac{2}{3}} \right)} - P^4 - (\pi a^2 P_{cp} \lambda^{\frac{1}{3}})^4 \right)}{P^4 - (\pi a^2 P_{cp})^4}, \quad (1)$$

где P – действующая нагрузка (расчетная нагрузка на тело качения), P_{cp} – среднее давление на пятне контакта [3], a – радиус пятна контакта, $l = \frac{B_{осн}}{B_{пок}}$, $B_{пок} = \frac{1 - m_{пок}}{E_{пок}}$, $B_{осн} = \frac{1 - m_{осн}}{E_{осн}}$, $\mu_{пок}$ и $\mu_{осн}$ – коэффициенты Пуассона для материалов покрытия и основы, $E_{пок}$ и $E_{осн}$ – модули упругости материалов покрытия и основы.

Как видно из (1), толщина покрытия зависит от размеров пятна контакта и сил, действующих в зоне нанесения покрытия, которые, в свою очередь, зависят от геометрических параметров обрабатываемого подшипника и технологического угла скрещивания [4].

Для оптимизации технологических режимов обработки была определена зависимость производительности процесса, которая показывает величину площади обработанной поверхности в единицу времени:

$$v = 2\pi S \left| n_{вн} \pm n_n \right| \frac{r_{вн} \cdot r_n}{r_{вн} + r_n}, \quad (2)$$

где S – площадь полосы обработанной поверхности после прохождения пятна контакта, r_n и $r_{вн}$ – радиус рабочей поверхности наружного и внутреннего колец, $n_{вн}$ и n_n – частота вращения внутреннего и наружного колец, знак «+» ставится при встречном движении внутреннего и наружного колец, «-» при попутном.

В условиях такой обкатки на рабочих поверхностях роликов и дорожек качения формируется износостойкое покрытие и рациональный профиль, пригодный для работы подшипников в условиях неизбежных перекосов их колец. Данный процесс позволяет увеличить долговечность работы подшипников в 2 раза, снизить уровень вибраций, уровень шума, момент трения. Данную операцию можно использовать в производстве на конечных стадиях технологических процессов изготовления подшипников качения повышенной долговечности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федорцев В.А. Высокоэффективные методы упрочнения деталей узлов трения машин и приборов / В.А. Федорцев, С.А. Иващенко. Минск: УП «Технопринт», 2002. 181 с.
2. Фрикционное плакирование металлом по металлу. Ч. 2 / Л.С. Белевский, С.А. Тулупов, О.М. Смирнов, Я. Гордон, И.Л. Белевский // Металлург. 2006. №11. С. 36-38.

3. Сутягин О.В. Контактное взаимодействие твердых тел / О.В. Сутягин. Калинин: КГУ, 1986. 35 с.

4. Пряхин И.В. Особенности контактного взаимодействия рабочих поверхностей подшипника при нанесении функционального покрытия в процессе их совместной доработки в собранном виде / И.В. Пряхин, О.Ю. Давиденко // Вестник СГТУ. 2009. №3(41) Вып. 2. С. 61-164.

Пряхин Иван Владимирович – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Pryahin Ivan Vladimirovich – post-graduate faculty «Technology of mechanical engineering» Saratov State Technical University

Давиденко Олег Юрьевич – доктор технических наук, профессор, декан машиностроительного факультета Саратовского государственного технического университета

Davidenko Oleg Yurevich – Doctor of technical sciences, professor, dean of faculty of machine-building Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 11.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.91

Д.И. Седов, Т.Г. Насад

КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Исследовано качество обработанной поверхности деталей из труднообрабатываемых материалов. Получены зависимости, устанавливающие взаимосвязь между температурой резания, скоростью резания и шероховатостью поверхности.

Качество поверхности, скорость резания, температура резания

D.I. Sedov, T.G. Nasad

QUALITY OF PROCESSING SURFACE UNDER SPEEDIEST PROCESSING WITH LOW-TEMPERATURE BY COOLING

Explored quality of processing surface of details from hard-processed material. Received dependencies, installing intercoupling between the temperature of cutting, velocity of cutting and quality surface.

Quality of surface, velocity of cutting, temperature of cutting

К современной продукции машиностроения предъявляют всё более жесткие требования по качеству, надёжности и долговечности агрегатов и узлов, что ведет к применению новых материалов с высокими эксплуатационными свойствами, такими как: жаропрочность, жаростойкость, высокопрочность, кислотостойкость, износостойкость и пр. В основном та-

кие материалы являются труднообрабатываемыми, характеризуются повышенным теплообразованием в зоне резания, что влияет на стойкость режущих материалов и ограничивает диапазон применимых скоростей, следовательно, возрастает время на обработку и увеличивается себестоимость изготовления.

Для компенсации неблагоприятных факторов, связанных со свойствами труднообрабатываемых материалов, на первый план выходят способы оптимизации и модернизации производства с применением методов обработки, основанных на структурных изменениях обрабатываемого материала в процессе резания и увеличении производительности за счёт повышения скорости обработки.

Существует множество способов изменения структуры обрабатываемого материала, например термические (высокотемпературные и низкотемпературные), химическо-термические, магнитные, облучение малыми дозами гамма-квантов или электронов и другие способы, а также различные их комбинации [1].

Одним из способов воздействия на физические свойства материалов является предложенный метод высокоскоростной обработки с дополнительным охлаждением, подробно рассмотренный в [3].

Теоретические и экспериментальные исследования в области тепловых явлений возникающих при ВСО с предварительным охлаждением, показали:

- При высокоскоростном точении с дополнительным охлаждением титановых сплавов с увеличением скорости резания с 80 до 120 м/мин происходит снижение теплового потока на $8,5 \div 11,2 \%$.

- Предварительное охлаждение заготовки от 293°K ($+20^{\circ}\text{C}$) до 250°K (-20°C) снижает тепловую нагрузку на $5,34 \div 8,7\%$.

- Совокупное снижение температуры в зоне резания составляет $15 \div 19\%$.

- Температурный запас позволяет увеличивать скорость обработки титана (температурное ограничение для титановых сплавов – возгорание пыли при 1400°C , возгорание стружки при 1600°C).

Однако процесс формирования шероховатости поверхности, образующейся после ВСО с предварительным охлаждением, требует детального изучения.

Шероховатость обработанной поверхности определяется наличием в профиле периодической и случайной составляющих. Периодическая составляющая профиля шероховатой поверхности зависит от геометрии режущего инструмента, способа его заточки, режимов резания и колебаний в зоне резания. Случайная составляющая зависит от интенсивности протекания пластических деформаций при резани и режимов обработки, механических свойств обрабатываемого материала, геометрии режущего инструмента. Известны зависимости, выражающие численную величину различных структурных составляющих профиля шероховатой поверхности от различных факторов при традиционных способах механообработки [2].

В случае ВСО с дополнительным охлаждением данные закономерности не работают, поскольку имеет место изменение механических свойств обрабатываемого материала. В работах Степанова Г.В., Насад Т.Г. и др. приведён анализ высокоскоростного резания, при котором был выявлен эффект охрупчивания, также из материаловедения и работ, проведённых Кумабе Д. по исследованию низкотемпературного резания, был подтверждён эффект низкотемпературного охрупчивания у углеродистых сталей (ОЦК-решётка) при $(-18^{\circ}\text{C}) \div (-20^{\circ}\text{C})$. В обоих направлениях исследования результатом охрупчивания стало уменьшение доли пластической деформации при формировании шероховатой поверхности при резани с высокими скоростями, также и при резании с низкими температурами, следствием стало уменьшение доли случайной составляющей.

В ходе проведённой работы было исследовано совокупное влияние скорости и предварительного охлаждения заготовки на качество поверхности таких марок стали как Ст45,

30ХГСН и ВТ2-1. На рис. 1 приведены профилограммы, снятые с образцов марки ВТ2-1 при ВСО без охлаждения и при ВСО с дополнительным охлаждением.

Изучение обработанной поверхности показало:

- чёткий след режущего клина, расположенный на величину подачи;
- в профиле в обоих случаях преобладание периодической составляющей.

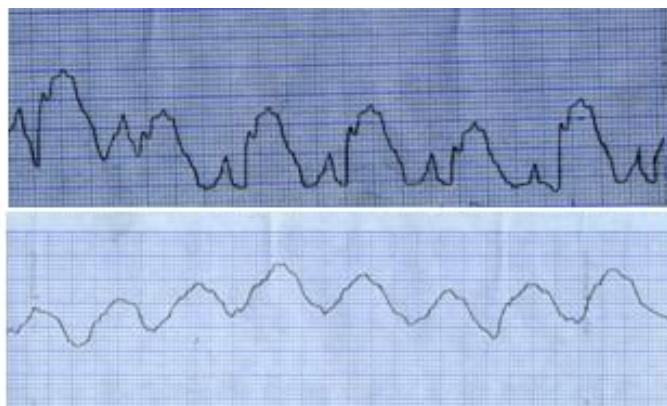


Рис. 1. Профилограммы ВТ2-1 $V = 100$ м/мин, $S = 0.2$ об/мин, $t = 0,5$ мм (вверху без охлаждения, внизу с охлаждением)

На основании проведенных экспериментов была выявлена зависимость шероховатой поверхности от режимов и температуры заготовки, полученная методом планирования экспериментов с преобразованием исследуемого параметра и факторов. В результате уравнение линейной регрессии, выраженное через действительные значения исследуемых параметров, будет иметь вид

Для Ст45:

$$Rz = 10,031 + (-1,156) \times \frac{T - T_{cp}}{T_{cp} - T_{min}} + (-0,987) \times \frac{V - V_{cp}}{V_{cp} - V_{min}} \quad (1)$$

Для сплава ВТ2-1:

$$Rz = 6,225 + (-0,54) \times X \frac{T - T_{cp}}{T_{cp} - T_{min}} + (-1,085) \times \frac{V - V_{cp}}{V_{cp} - V_{min}} \quad (2)$$

Для 30ХГСН:

$$Rz = 10,3925 + (-1,4445) \times \frac{T - T_{cp}}{T_{cp} - T_{min}} + (-1,1955) \times \frac{V - V_{cp}}{V_{cp} - V_{min}} \quad (3)$$

где T – температура заготовки, V – скорость резания.

На рис. 2 приведены зависимости шероховатости от скорости резания и температуры заготовки экспериментальные и их аппроксимации.

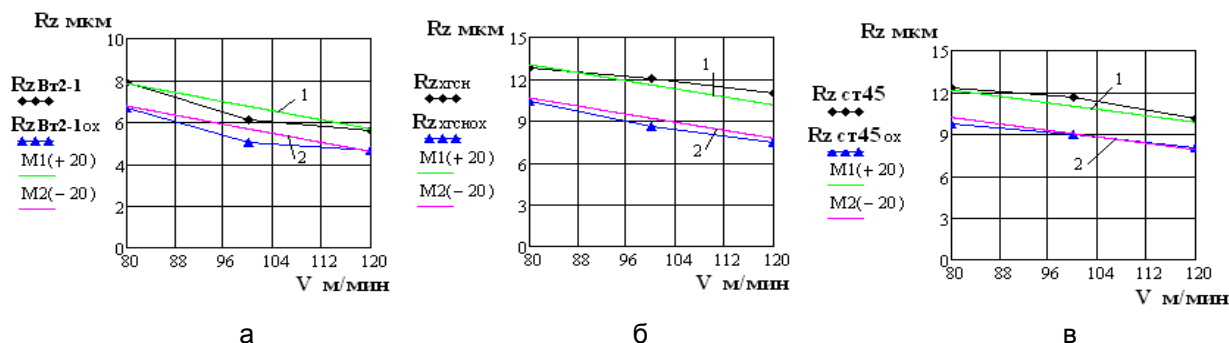


Рис. 2. а) экспериментальные данные для VT2-1; б) экспериментальные данные для 30XГСН; в) экспериментальные данные для СТ45 ♦♦♦ – без охлаждения ▲▲▲ – с охлаждением, графики 1, 2 – аппроксимации

Выводы

1. При ВСО с дополнительным охлаждением наблюдается снижение шероховатости 1,5 ÷ 2 раза по сравнению с ВСО без охлаждения.
2. Чёткий след режущего клина, расположенный на величину подачи и преобладание периодической составляющей.
3. Параметры качества обработки после ВСО с дополнительным охлаждением прогнозируемы и следовательно управляемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Насад Т.Г. Высокоскоростная обработка труднообрабатываемых материалов / Т.Г. Насад, И.Е. Кирюшин, Д.Е. Кирюшин. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 148 с.
2. Насад Т.Г. Влияние теплового фактора на формирование качества поверхности деталей при высокоскоростной обработке с фрикционным нагревом зоны резания / Т.Г. Насад, А.А. Шевченко // Технический вуз – наука, образование и производство в регионе: материалы Всерос. науч.-техн. конф. / Тол. гос. ун-т. Тольятти, 3-4 октября 2001 г. Тольятти, 2001. С. 79-85.
3. Седов Д.И. Повышение эффективности обработки титановых сплавов за счёт предварительного охлаждения / Д.И. Седов, Т.Г. Насад // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. №1(52). Вып. 1. С. 88-96.

Насад Татьяна Геннадиевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета

Nasad Tatiyana Gennadievna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Technology and Equipment of Electro-chemical and Electro-physical Processing Methods» of Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

Седов Дмитрий Игоревич – аспирант кафедры «Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета

Sedov Dmitriy Igorevich – post-graduate faculty «Technology of Electro-chemical and Electro-physical Processing Methods» of Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.91

Д.И. Седов, Т.Г. Насад**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ**

Рассмотрен новый способ повышения эффективности обработки титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов за счет сочетания высоких скоростей резания с предварительным охлаждением обрабатываемой поверхности. Приведены теплофизика и экспериментальные исследования процесса высокоскоростной обработки титановых сплавов с охлаждением поверхности детали.

Высокоскоростная обработка, охлаждение

D.I. Sedov, T.G. Nasad**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF PROCESS OF HIGH-SPEED PROCESSING WITH LOWTEMPERATURE COOLING**

The new way of increase of efficiency of processing of titanic alloys and other hard-processed materials at the expense of a combination of high speeds of cutting to preliminary cooling of a processed surface is considered. The thermophysics and experimental researches of process of high-speed processing of titanic alloys with cooling of a surface of a detail are resulted.

Speediest processing, cooling

В современном машиностроении неуклонно повышаются требования к качеству, надёжности и долговечности агрегатов и узлов машин и различных механизмов. Подобные требования приводят к широкому применению новых материалов с особыми физико-механическими свойствами: жаростойкие, жаропрочные, высокопрочные, нержавеющие, коррозионностойкие и другие, все эти сплавы относятся к труднообрабатываемым материалам. При обработке труднообрабатываемых материалов наблюдаются большие силы резания и более интенсивные вибрации, чем при обработке углеродистых и низколегированных конструкционных сталей при тех же условиях. Также отмечают интенсивное теплообразование и высокую температуру на поверхностях контакта с инструментом. С увеличением температуры снижается твёрдость поверхностных слоёв инструмента, усиливаются процессы диффузии и схватывания между обрабатываемым материалом и инструментом, увеличивается разрушение граней. Всё это приводит к невозможности применения производительных режимов обработки, быстрому износу инструмента, прерыванию обработки для переточки инструмента и наладки станка и, следовательно, многократному увеличению времени обработки детали [1, 3].

Современные условия рынка также накладывают жесткие рамки конкурентоспособности и рентабельности на производителей в области машиностроения как для отдельно взятого предприятия, так и для отрасли в целом. Исключительной особенностью для российского машиностроения является то, что примерно 60% территории, на которой сосредоточено до 80% полезных ископаемых, находится в зоне вечной мерзлоты, к ним относятся районы Арктики, крайнего севера, Сибири и дальневосточного региона. Одним из существенных препятствий для развития обрабатывающего производства являются продолжительные отрицательные температуры на протяжении календарного года, что означает колоссальные затраты в виде тепловых потерь и нагрева заготовок до температуры $+15 \div +20^{\circ}\text{C}$. Данная особенность

в совокупности с затратами на транспортировку к основным потребителям сводит к нулю конкурентоспособность в данных регионах.

Ниже на рис. 1 и 2 приведены климатические особенности географического положения Российской Федерации и стран бывшего Советского Союза [4].

Для компенсации транспортных затрат в данных регионах необходимо в области машиностроения производить конечный высокотехнологичный продукт, показателем которого является соотношение массы m (объёма V) изделия к его рыночной стоимости C (уменьшение массы (объёма) при высокой стоимости на рынке) $\frac{m}{C}$ или $\frac{V}{C}$.

Очевидным является развитие полных циклов производства от добычи до конечного продукта, однако в таком случае мы сталкиваемся с такой более сложной задачей как тепловые потери и затраты на нагрев заготовки. Для решения данной проблемы возможно применение комбинированных способов с внесением дополнительных потоков энергии в зону резания. Системный анализ в [1], разработанный профессором Насад Т.Г., Кирюшиным И.Е, Кирюшиным Д.Е. показал, что для осуществления эффективной обработки с комбинированием энергий необходимо обеспечить управление тепловым фактором с целью обеспечения в зоне деформации оптимальных температур для контактирующей пары инструмент – деталь.

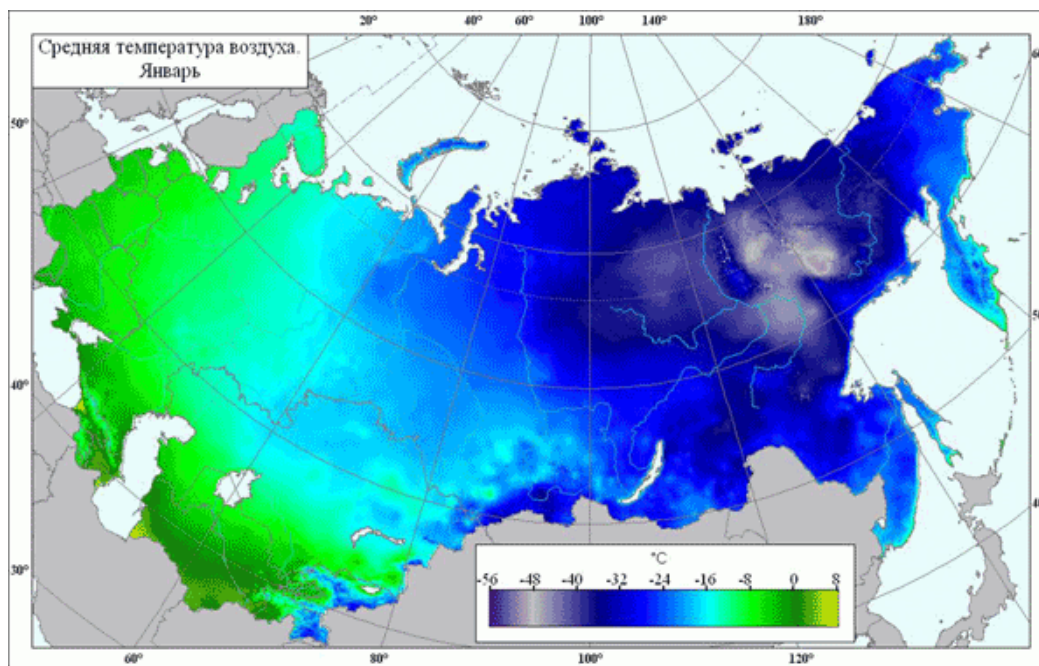


Рис. 1. Средняя температура воздуха за январь на территории бывшего Советского Союза

В рамках системного анализа предложен комбинированный метод на основе высокоскоростного точения в сочетании низкотемпературным резанием. Суть предложенного комбинированного метода высокоскоростного точения с дополнительным охлаждением заключается во взаимной компенсации недостатков одного метода за счёт другого, в частности, компенсация высоких температур в зоне резания применительно к титановым сплавам [1, 2].

При условии региональной направленности предложенного комбинированного метода необходимость дополнительного охлаждения (до -20°C) заготовок сводится к поддержанию уже холодного состояния обрабатываемого материала и выравнивания температуры (-18°C) ÷ (-20°C) – порог хладноломкости углеродистых сталей, что снижает затраты на охлаждение.

В ходе исследования процесса высокоскоростного точения с дополнительным охлаждением были проведены теоретические и практические исследования температурных полей ВСО с предварительным охлаждением заготовки.

Общую мощность тепловыделения при ВСО полагают эквивалентной механической работе деформирования и работе сил трения на контактных площадках [1] и находят по формуле (1). С учётом предварительного охлаждения можно записать:

$$W^+ = W_D^+ + W_{1T}^+ + W_{2T}^+ - W_{OX}^-, \quad (1)$$

где W_D^+ , W_{1T}^+ , W_{2T}^+ – соответственно мощности тепловыделения источников, возникающих в процессе обработки в области плоскости сдвига, на передней и задней поверхности инструмента; W_{OX}^- – мощность дополнительного стока (предварительное охлаждение).

Знак «-» показывает, что рассматривается процесс резания с дополнительной энергией (охлаждением).



Рис. 2. Карта вечной мерзлоты северного полушария, 62% территории России и приходится на «многолетнюю криолитзону» [4]

Запишем систему уравнений, характеризующих распределение теплоты между контактирующими телами:

$$\begin{cases} W^+ = W_C^+ + W_H^+ + W_P^+ = P \times (\Theta) V \\ W_C^+ = b^* W_D^- + W_{1T}^+ - W_1^+ \\ W_H^+ = (1 - b^*) W_D^- + W_{2T}^+ - W_2^+ \\ W_P^+ = W_1^+ + W_2^+ \end{cases} \quad (2)$$

где W_C^+ , W_H^+ , W_P^+ – соответственно теплота в стружке, изделии и резце; b^* – доля, характеризующая часть теплоты деформации, передаваемой стружке; W_1^+ , W_2^+ – тепловая мощность итоговых потоков теплоты.

Расчёт интенсивности итоговых потоков теплообмена между стружкой, резцом и деталью выполняется на основе попарного сравнения температур [1] и совместного решения уравнений (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\Theta}_c = \bar{\Theta}_1 \quad \text{и} \quad \bar{\Theta}_c = \bar{\Theta}_2 \\ (1+c)\Theta_d + 0,75 \frac{\sqrt{w}}{I} L_c \cdot \sqrt{\frac{kl_1}{V}} (q_{1T} - q_1) = 0,75 \sqrt{\frac{w}{I}} q_1 \cdot \sqrt{\frac{kl_1}{V}} L_c \\ (1+c)\Theta_d + 0,75 \sqrt{\frac{w}{I}} L_c \sqrt{\frac{kl_1}{V}} (q_{1T} - q_1) = (1+c)\Theta_d T_H + 1,13 \cdot \frac{\sqrt{wl_2}}{I \sqrt{V}} (q_{2T} - q_2) \end{array} \right. \quad (3)$$

В ходе теоретических исследований были определены диапазоны влияния предварительного охлаждения в сочетании с высокоскоростным резанием на распределение потоков теплоты в зоне резания для титановых сплавов:

- При высокоскоростном точении с дополнительным охлаждением титановых сплавов с увеличением скорости резания с 80 до 120 м/мин происходит снижение теплового потока на 8,5 ÷ 11,2 %.
- Предварительное охлаждение заготовки от 293°К (+20°С) до 250°К (-20°С) снижает тепловую нагрузку 5,34 ÷ 8,7%.
- Совокупное снижение температуры в зоне резания составляет 15 ÷ 19%.

Для получения результатов по комбинированному методу были проведены также практические исследования тепловых процессов, протекающих в зоне резания, при высокоскоростном точении охлаждённых заготовок.

Было проведено изучение термоЭДС. Исследованы пары Т15К6 – Ст45, Т15К6 – 30ХГСН, Т15К6 – ВТ2-1. Точение заготовок диаметром 35, 60, 90 мм и длиной 150 ÷ 300 мм из сталей Ст45, 30ХГСН, ВТ2-1 проводили в зажатом патроне с поджатым задним вращающимся центром на токарном станке 16К20. Использовали стандартные прямые резцы с механическим креплением режущих пластин.

ТермоЭДС при резании фиксировали цифровым осциллографом С8-2.

Исследования проводили в следующем диапазоне режимов:

скорость резания $V = 80 \div 120$ м/мин, подача $S = 0,2$ м/об, глубина резания $t = 0,5$ мм, температура заготовки $T = (-28^\circ\text{C}) \div (+20^\circ\text{C})$.

На основании проведенных экспериментов была выявлена зависимость температуры зоны резания от режимов и температуры заготовки, полученная методом планирования экспериментов с преобразованием исследуемого параметра и факторов. В результате уравнение линейной регрессии, выраженное через действительные значения исследуемых параметров, будет иметь вид:

Для Ст45:

$$\Theta = 458 + 0,782 \times T + 1,348 \times V \quad (4)$$

Для сплава ВТ2-1:

$$\Theta = 386,5 + 0,7145 \times T + 0,897 \times V \quad (5)$$

Для 30ХГСН:

$$\Theta = 345,4434 + 0,8509 \times T + 0,9678 \times V \quad (6)$$

где Θ – температура в

зоне резания, T – температура заготовки, V – скорость резания.

На рис. 3 приведены зависимости итоговой температуры от скорости резания и температуры заготовки.

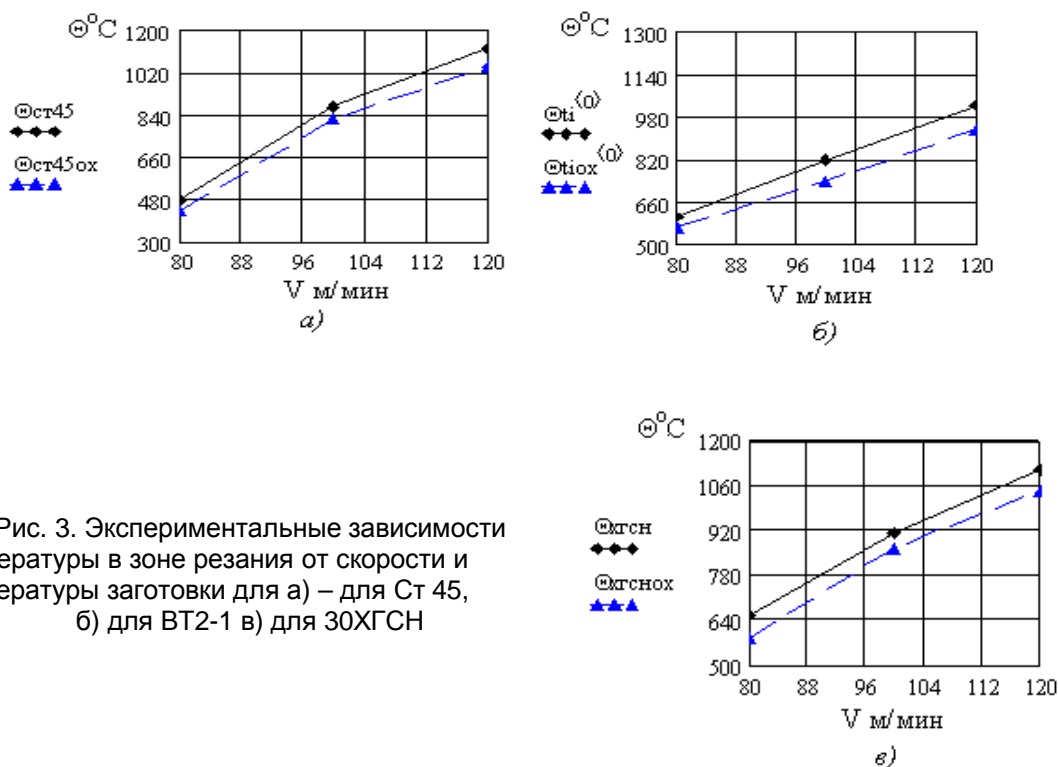


Рис. 3. Экспериментальные зависимости температуры в зоне резания от скорости и температуры заготовки для а) – для Ст 45, б) для BT2-1 в) для 30XГСН

Выводы

1. Полученные экспериментальные данные находятся в пределах теоретически рассчитанных диапазонов тепловых потоков
2. Во всех случаях ВСО с предварительным охлаждением происходит снижение температуры в зоне резания, что влияет на выходные параметры качества изделия, в частности проведённые измерения показали снижение шероховатости поверхности в $1,5 \div 2$ раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Насад Т.Г. Высокоскоростная обработка труднообрабатываемых материалов / Т.Г. Насад, И.Е. Кирюшин, Д.Е. Кирюшин. Саратов: СГТУ, 2009. 148 с.
2. Насад Т.Г. Влияние теплового фактора на формирование качества поверхности деталей при высокоскоростной обработке с фрикционным нагревом зоны резания / Т.Г. Насад, А.А. Шевченко // Технический вуз – наука, образование и производство в регионе: материалы Всерос. науч.-техн. конф. / Тол. гос. ун-т. Тольятти, 3-4 октября 2001. Тольятти, 2001. С. 79-85.
3. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. М.: Машиностроение, 1982. 279 с.
4. www.beliona.ru

Насад Татьяна Геннадиевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета

Седов Дмитрий Игоревич – аспирант кафедры «Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета

Nasad Tatiyana Gennadievna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Technology and Equipment of Electro-chemical and Electro-physical Processing Methods» of Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

Sedov Dmitriy Igorevich – post-graduate faculty «Technology of Electro-chemical and Electro-physical Processing Methods» of Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.91.01

А.Н. Селиванов, Т.Г. Насад

РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ВАЛОВ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗОТОЧЕНИЯ

Приводятся экономические расчеты, характеризующие обработку валов методом высокоскоростного фрезоточения. Рассчитывается стоимость обработки заготовки длиной один метр.

Валы, фрезоточение, высокоскоростное резание, себестоимость

A.N. Selivanov, T.G. Nasad

CALCULATION OF ECONOMIC EFFICIENCY OF PROCESSING OF SHAFT BY THE METHOD HIGH-SPEED TURN-MILLING

The economic calculations characterizing processing of shaft by a method high-speed turn-milling are resulted. Cost of processing of preparation long one meter pays off.

Shafts, turn-milling, high speed cutting, price cost

Повышение производительности и снижение себестоимости изготавливаемой продукции всегда являлись актуальными задачами производства. Обычно такие задачи решаются за счет применения современного высокопроизводительного оборудования, разработки и внедрения прогрессивного режущего инструмента, инструментальных материалов и схем резания. Все это связано с вложением денежных средств в большом количестве. При этом увеличение производительности обычно не превышает 20%, а увеличение себестоимости может достигать 20±5%.

Перед внедрением новых технологий и методов обработки в производство проводится экономический анализ для оценки результатов хозяйственной деятельности с целью выявления резервов и путей их мобилизации.

Обладая рядом технических преимуществ, высокоскоростное фрезоточение валов является одним из перспективных направлений в машиностроении [1]. Однако экономический эффект внедрения данного метода обработки на производстве не известен. Для этого проведем расчеты себестоимости обработки заготовки методом точения и фрезоточения.

Условием, определяющим целесообразность применения высокоскоростного фрезоточения, является снижение суммарных затрат на производство годовой программы деталей по сравнению с затратами в условиях, когда данный вид обработки не применяется, снижением трудоемкости изготовления при обеспечении требуемого качества поверхности.

Исходные данные [2] для расчетов технических показателей занесены в табл. 1.

Таблица 1

Фрезоточение	Точение
Исходные данные	
D = 76 мм (диаметр детали); L = 1000 мм (длина обрабатываемой поверхности);	
Условно принятые значения	
h = 1,25 мкм (высота огранки); D _{фр} = 100 мм (диаметр фрезы); Z = 10 (число режущих зубьев фрезы); V = 120 м/мин (скорость резания); S _z = 0,45 мм/зуб (окружная подача)	Шероховатость = Ra 1,25; r = 0,8 мм (радиус при вершине резца); S = 0,33 мм/об (величина подачи); V = 120 м/мин (скорость резания)
Расчетные значения	
машинное время T _{м1} = 0,152 мин или 0,046 ч.	машинное время T _{м2} = 15,3 мин или 0,255 ч

Для определения экономической эффективности изучаемого процесса рассчитаем стоимость одного часа работы станка по формуле [3]:

$$C_{п.з.} = C_з + C_{ч.з.} + E_n \times (K_{ст} + K_{зд}) + C_{свет} + C_{р.пл} + C_{опр} \quad (1)$$

где $C_{п.з.}$ – часовые приведенные затраты (руб./ч); $C_з$ – основная и дополнительная зарплата (руб./ч); $C_{ч.з.}$ – часовые затраты на эксплуатацию рабочего места (руб./час); E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений в станок и здание. Для машиностроения $E_n = 0,15$.

Для повышения точности расчетов учтем стоимость электроэнергии, режущих пластин и инструментальной оправки.

$$C_з = \varepsilon \times C_{тф} \times K, \quad (2)$$

где $C_{тф}$ – часовая тарифная ставка станочника сдельщика соответствующего разряда (руб./ч); ε – коэффициент, учитывающий дополнительную зарплату и начисления на социальное страхование. Для машиностроения $\varepsilon = 1,53$; K – коэффициент, учитывающий зарплату наладчика, $K = 1$, если наладка производится самим рабочим. $K = 1,1 \div 1,5$, если наладка производится специальным техническим персоналом.

$$C_{ч.з.} = C_{ч.з.}^{б.н} \times K_m, \quad (3)$$

$C_{ч.з.}^{б.н}$ – часовые затраты на базовом рабочем месте; K_m – коэффициент, показывающий, во сколько раз затраты, связанные с работой данного станка, больше, чем аналогичные расходы у базового.

$$K_{ст} = \frac{Ц}{F\delta \cdot t}; \quad (4)$$

где $Ц$ – балансовая стоимость станка (руб.); $F\delta$ – действительный годовой фонд времени станка (час); t – коэффициент загрузки станка.

$$K_{зд} = \frac{F \cdot 78,4}{F_d \cdot m}; \quad (5)$$

где F – производственная площадь, занимаемая станком с учетом проходов (m^2).

$$F = f \times \kappa_f \quad (6)$$

f – площадь станка в плане (m^2); κ_f – коэффициент, учитывающий дополнительную производственную площадь с учетом проходов и проездов; $C_{\text{свет}}$ – стоимость 1 кВт/ч эл. энергии (руб./кВт); $C_{\text{р.пл.}}$ – стоимость 1 режущей пластины (руб.); $C_{\text{опр.}}$ – стоимость инструментальной оправки (руб.); T – период стойкости пластины (мин).

Подставив данные из табл. 2 в формулу (1), получаем

Сп.з. = $52,02 + 61,2 + 0,15 \times (1706,37 + 37,75) + 4,05 + 135,3 + 0,093 = 514,29$ руб./ч – фрезоточение;

Сп.з. = $52,02 + 39,78 + 0,15 \times (698,06 + 44,22) + 14,28 + 153 = 370,42$ руб./ч – точение.;

Исходные данные для расчетов экономических показателей занесены в табл. 2.

Таблица 2

№	Показатели	Технологии	
		базовая	фрезоточение
1	Годовая программа (шт.), A ,	10000	10000
2	Операционное время (ч), T_m	0,255	0,046
3	Часовая тарифная ставка станочника-сдельщика соответствующего разряда (руб./ч), $Стф$.	34	34
4	Часовые затраты на базовом рабочем месте (руб./ч)	30,6	30,6
5	Коэффициент, показывающий, во сколько раз затраты, связанные с работой данного станка, больше, чем аналогичные расходы у базового, K_m	1,3	2
6	Используемое оборудование	16K25Ф3С5	PUMA MX 2500 ST
7	Балансовая стоимость станка (руб.); $Ц$	2 250 000	5 500 000
8	Производственная площадь, занимаемая станком с учетом проходов (m^2), F	5,17	15,59
9	Площадь станка в плане (m^2), f	3,44	10,35
10	Коэффициент, учитывающий дополнительную производственную площадь с учетом проходов и проездов, κ_f	1,5	1,5
11	Мощность станка (кВт), N	14	22
12	Стоимость 1 кВт/ч эл. энергии (руб.), $C_{\text{свет}}$.	4	4
13	Стоимость 1 режущей пластины (руб.), $C_{\text{р.пл.}}$	150	150
14	Период стойкости пластины (мин), T	15	30
15	Стоимость оправки (руб.), $C_{\text{опр.}}$	300	15 000
16	Действительный годовой фонд времени станка (ч), F_d	4029	4029

Таблица 3

Варианты обработки	Трудоемкость, мин/м	Себестоимость, руб/м
Фрезоточение	0,046	23,65
Точение	0,255	94,45

Для расчета себестоимости обработки заготовки длиной 1 м воспользуемся формулой

$$\text{Собщ} = \text{Сп.з.} \times T_M \quad (7)$$

Подставив имеющиеся данные в формулу (7), получаем

Фрезоточение: $\text{Собщ} = 23,65 \text{ руб/м}$;

Точение: $\text{Собщ} = 94,45 \text{ руб/м}$

Полученные результаты сводим в табл. 3.

Сравним данные по первому и второму варианту:

$$\frac{T_{\text{общ}2} - T_{\text{общ}1}}{T_{\text{общ}1}} \cdot 100\% = \frac{0,255 - 0,046}{0,046} \cdot 100\% = 454,34\%$$

$$\frac{\text{Собщ}2 - \text{Собщ}1}{\text{Собщ}1} \cdot 100\% = \frac{94,45 - 23,65}{23,65} \cdot 100\% = 299,36\%$$

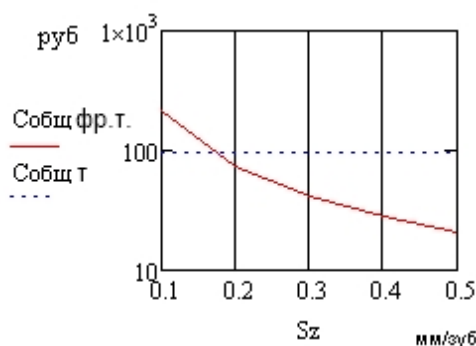
Относительное сравнение себестоимости и трудоемкости вариантов процесса обработки детали длиной 1 метр показало, что при вышепринятых исходных данных обработка валов методом фрезоточения выигрывает по сравнению с токарной обработкой по трудоемкости на 454,34 %, и себестоимости на 299,36 %.

Для расчета годового экономического эффекта воспользуемся формулой

$$\text{Эг} = (\text{Собщ}_2 - \text{Собщ}_1) \times A, \quad (8)$$

где Эг – годового экономического эффект (руб.); Собщ_1 – себестоимость изготавливаемой продукции при базовой технологии (руб./шт.); Собщ_2 – себестоимость изготавливаемой продукции при новой технологии (руб./шт.); A – годового объема изготавливаемой продукции (шт.).

Для определения диапазона экономической эффективности метода фрезоточения рассмотрим данный процесс при переменном значении подачи. Для этого, исходя из условия прочности режущей пластины, назначим подачу в интервале $S_z = 0,1 - 0,45 \text{ мм/зуб}$ [4]. Проведя аналогичные расчеты, построен график (рисунок), из которого следует, что при обработке валов методом высокоскоростного фрезоточения положительный экономический эффект будет наблюдаться при значении подачи $S_z > 0,2 \text{ мм/зуб}$.



Интервал экономической эффективности

Выводы

Проведенные технико-экономические расчеты и сравнительная их характеристика показали:

1. Несмотря на большие первоначальные капиталовложения в оборудование и инструмент, высокую мощность оборудования при обработке валов фрезоточением производительность может возрасти до 4,5 раза, а себестоимость снижаться до 3 раз по сравнению с токарной обработкой.

2. Для положительного экономического эффекта значение подачи при обработке валов фрезоточением не должно быть меньше 0,17 мм/зуб.

3. При обработке детали методом высокоскоростного фрезоточения годового экономического эффект может составить от 96 800 до 708 000 руб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селиванов А. Н. Обеспечение качества обработки валов из титановых сплавов методом высокоскоростного фрезерования и фрезоточения / А.Н. Селиванов, Т.Г. Насад // Вестник СГТУ. 2010. №3 (46). Вып. 1. С. 55-61.

2. Справочник технолога машиностроителя: в 2 т. Т. 1 / под ред. А. Г. Касиловой, Р. К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 656 с.

3. Горбачев А.Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов / А.Ф. Горбачев, В.А. Шкред. 4-е изд., перераб. и доп. Минск.: Выш. школа, 1983. 256 с.

4. <http://www.coromant.sandvik.com>

Селиванов Александр Николаевич – аспирант кафедры «Технология электрофизических и электрохимических методов обработки» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Selivanov Aleksander Nikolaevich – Postgraduate Student of the Department of «Technology of Electro-chemical and Electro-physical Processing Methods» of Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

Насад Татьяна Геннадиевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технология электрофизических и электрохимических методов обработки» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Nasad Tatiyana Gennadievna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Technology and Equipment of Electro-chemical and Electro-physical Processing Methods» of Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.91.01

А.Н. Селиванов, Т.Г. Насад, С.Я. Торманов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА МАРКИ ВТ 1-0 МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ОКРУЖНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Приводятся экспериментальные данные обработки валов методом высокоскоростного резания по схеме окружного фрезерования. Рассматривается процесс формирования качества обрабатываемой поверхности и стружкообразования.

Валы, фрезерование, высокоскоростное резание, титан, качество поверхности, усадка стружки

A.N. Selivanov, T.G. Nasad, S.Y. Tormanov

DATA EXPERIMENTAL RESEARCH OF PROCESS SWAFT FORMATION IN TIME CUTTING TITANIUM ALLOY VT 1-0 BY METHODS HIGH SPEED CIRCULAR MILLING

The article presents experimental data of shafts producing by high speed milling methods using circular milling shame. Processes of quality forming and chip formation are studding.

Shafts, milling, high speed cutting, titanium, quality of surfaces, chip formation

Обработка тел вращения многолезвийным инструментом в сочетании с высокими скоростями резания является одним из перспективных направлений развития машиностроительной отрасли. Применение такой комбинированной технологии способно повысить производительность процесса, стойкость режущего инструмента и улучшить ряд других технико-экономических показателей [1].

Проведённая оценка схем обработки тел вращения методом высокоскоростного фрезерования и фрезоточения выявила наиболее производительные и перспективные схемы обработки. Одной из них является схема окружного фрезерования [2].

Поставленная задача заключалась в получении экспериментальных данных с целью изучения процесса обработки деталей тел вращения из титанового сплава по предлагаемой технологии.

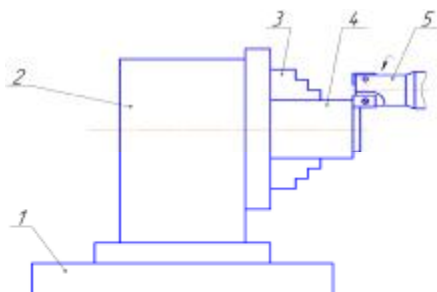


Рис. 1. Экспериментальная схема обработки:
1 – поворотный стол станка; 2 – угловая плита;
3 – трехкулачковый патрон; 4 – обрабатываемая заготовка; 5 – режущий инструмент



Рис. 2. Общий вид наладки, станок мод. 2206BMФ4

Для этого проводились две серии экспериментов. Первый этап предполагал получение общей информации, касающейся процесса стружкообразования, формирования качества поверхности и влияния скорости резания. Второй этап подразумевал изучение влияния режимов обработки на процесс резания.

Кинематика схемы обработки была смоделирована на многоцелевом станке модели 2206BMФ4 (рис. 2) с применением функции круговой интерполяции. Образец закреплялся неподвижно в трехкулачковый патрон, установленный на угловой плите поворотного стола станка (рис. 1). В качестве обрабатываемого материала использовался круглый прокат из ти-

танового сплава ВТ 1-0 твёрдостью HV 150 и σ_B 510 МПа. Инструмент – концевая фреза. Материал режущей части T5K10. Обработка производилась на режимах, приведенных в табл. 1 (серия №1) без применения СОТС.

Таблица 1

Режимы обработки титанового сплава ВТ 1-0

№	Схема подачи инструмента	Скорость резания V_p , м/мин	Подача S_o , мм/мин	Глубина резания t , мм	Ширина b , мм
1	Встречная	15	30	3	3
2	Попутная				
3	Встречная	70	120	3	3
4	Попутная				
5	Встречная	120	200	3	3
6	Попутная				

В ходе проведения эксперимента выяснено, что при обработке титанового сплава со скоростью резания 15 м/мин при встречной и попутной схеме подачи инструмента качество обработанной поверхности отличалось незначительно. При увеличении скорости резания при встречной схеме подачи инструмента качество поверхности снижается за счет налипания стружки на обработанную поверхность. При попутном фрезеровании наблюдалась чистая поверхность и происходило качественное удаление стружки из зоны резания (рис. 3).

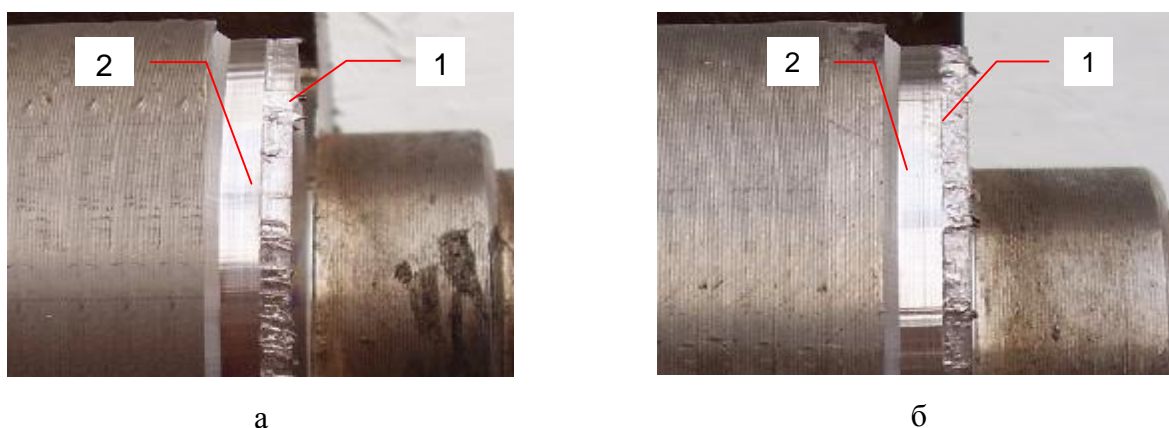


Рис. 3. Внешний вид обработанных поверхностей.
Схемы подачи инструмента:
1 – встречное фрезерование; 2 – попутное фрезерование

Полученные образцы стружки при встречной схеме подачи инструмента сильно деформированы, и с увеличением скорости резания деформация усиливается. При попутной схеме обработки полученная стружка имеет менее деформированное состояние (рис. 4).

Изучение экспериментальных образцов под микроскопом показало, что даже со скоростью 15 м/мин качество обработанной поверхности детали при встречной схеме обработки хуже, чем при попутной (рис. 5): наблюдается налипание материала в небольшом количестве.

Линии, образующиеся на поверхности, являются следами режущего инструмента (вертикальные (рис. 6)), параметры которых зависят от точности и качества изготовления режущих пластин, а горизонтальные – вершины огранки, образующейся на поверхности детали в процессе резания (рис. 5).

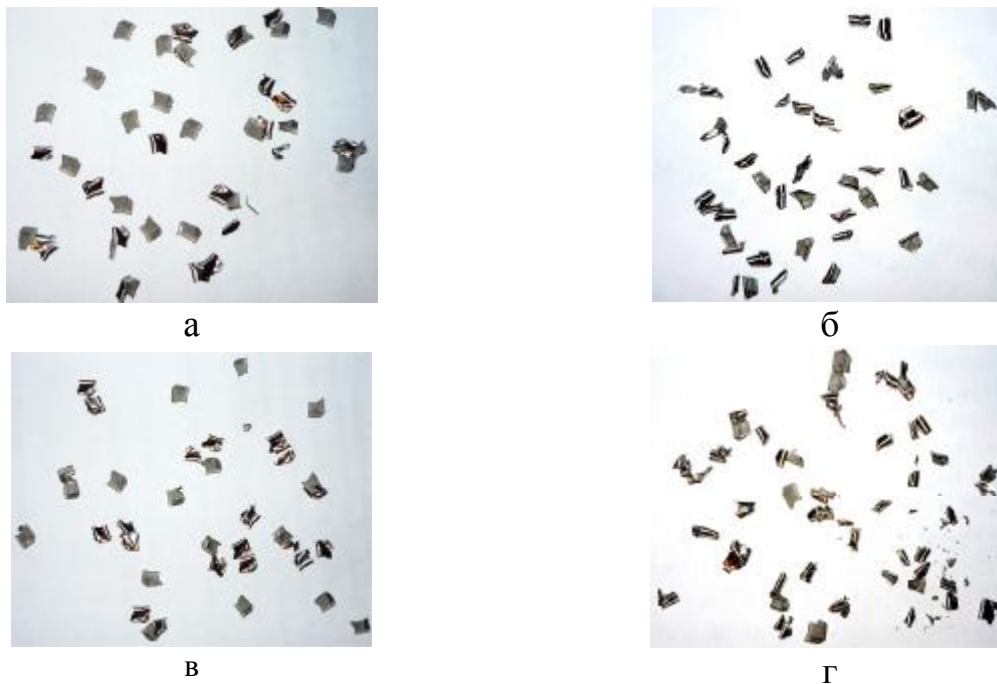


Рис. 4. Образцы стружки, полученные в процессе обработки
 а – попутное фрезерование; б – встречное фрезерование:
 $V_p = 70$ м/мин; $S_z = 0,13$ мм/зуб;
 в – попутное фрезерование; г – встречное фрезерование:
 $V_p = 120$ м/мин; $S_z = 0,13$ мм/зуб

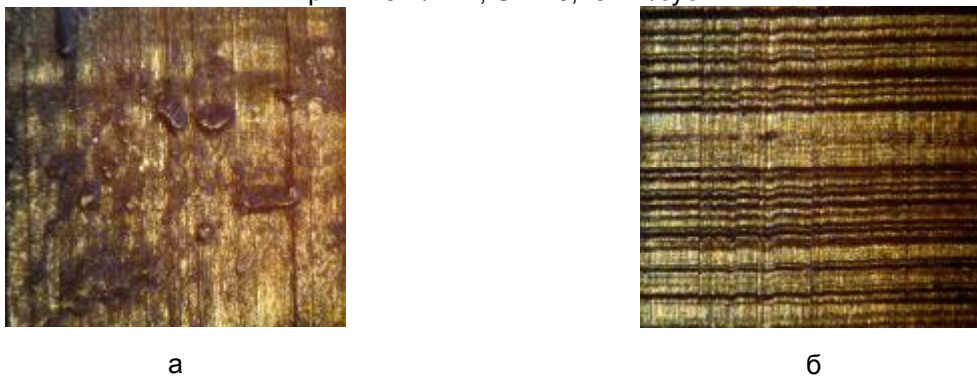


Рис. 5. Образцы поверхности при увеличении в 50 раз:
 а – встречное фрезерование; б – попутное фрезерование
 $V_p = 15$ м/мин; $S_z = 0,13$ мм/зуб

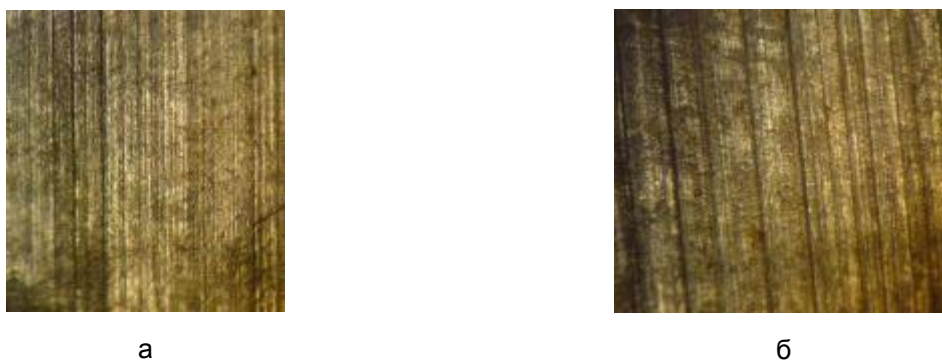


Рис. 6. Образцы поверхности при увеличении в 100 раз (попутное фрезерование)
 в – $V_p = 70$ м/мин; $S_z = 0,13$ мм/зуб;
 г – $V_p = 120$ м/мин; $S_z = 0,13$ мм/зуб

Результаты исследования полученных образцов стружки приведены на рис. 7. Видно, что наибольший коэффициент усадки стружки наблюдается при скорости резания 80 м/мин.

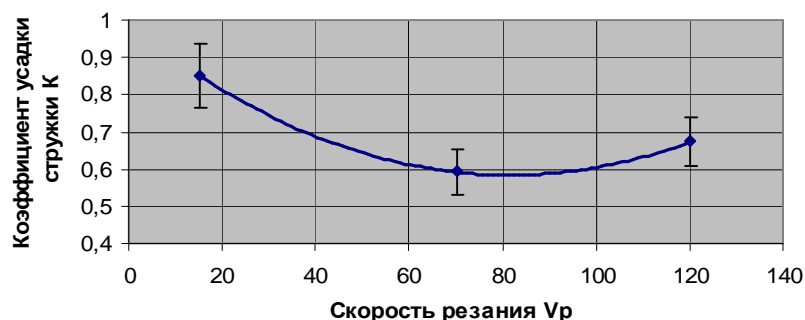


Рис. 7. Зависимость коэффициента усадки стружки K от скорости резания V_p

Вторая серия экспериментов проводилась с режущими пластинами марки ВК 15. Обработка производилась на режимах, приведенных в табл. 2, без применения СОТС с использованием встречной и попутной схем подачи инструмента.

Таблица 2

Режимы обработки титанового сплава ВТ 1-0

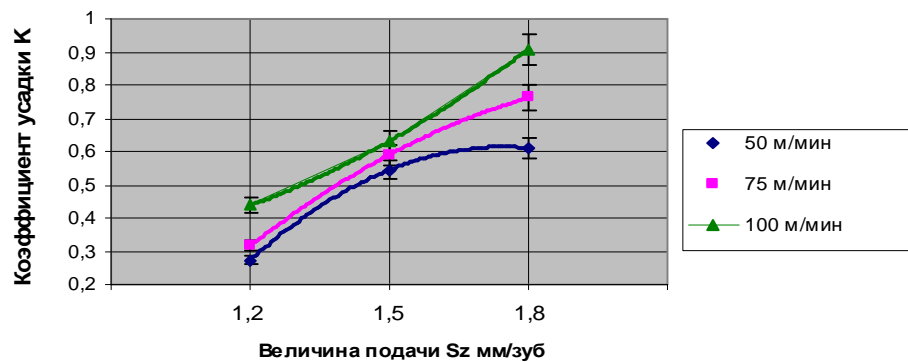
№	Скорость резания V_p , м/мин	Подача S_0 , мм/зуб	Глубина резания t , мм	Ширина b , мм
1	50	1,2	1	4
		1,5		
		1,8		
2	75	1,2	1	4
		1,5		
		1,8		
3	100	1,2	1	4
		1,5		
		1,8		

После исследования стружки были построены графики (рис. 8). В данном случае при встречной схеме подачи инструмента, скорости резания от 50 до 75 м/мин и подаче от 1,2 до 1,5 мм/зуб степень пластической деформации стружки увеличивается (рис. 8в, г), при дальнейшем увеличении режимов обработки деформация стружки уменьшается. При попутной схеме обработки с увеличением режимов резания коэффициент усадки стружки уменьшается. При этом наибольшее влияние на изменение усадки стружки оказывает величина подачи – для попутной схемы обработки и скорость резания – для встречной схемы. Во всех случаях наблюдается тенденция к уменьшению деформации стружки с увеличением режимов резания. Также на основании полученных данных можно предположить, что наибольшее налипание стружки будет проявляться в точках экстремума.

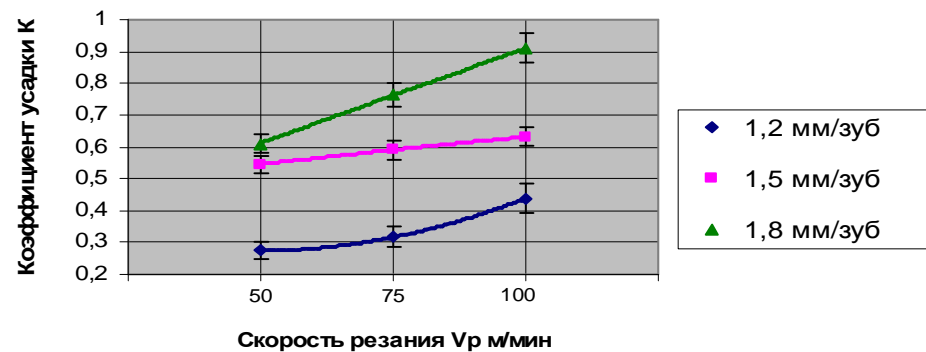
Выводы

Для проведения эффективной обработки тел вращения из титановых сплавов методом высокоскоростного окружного фрезерования необходимо соблюдать следующие рекомендации:

1. Использовать попутную схему подачи инструмента.
2. Для повышения производительности использовать максимально возможные режимы резания (S и V_p).
3. Скорость резания должна находиться в диапазоне от 80 м/мин и выше.
4. Использовать режущие пластины с ровными режущими кромками.

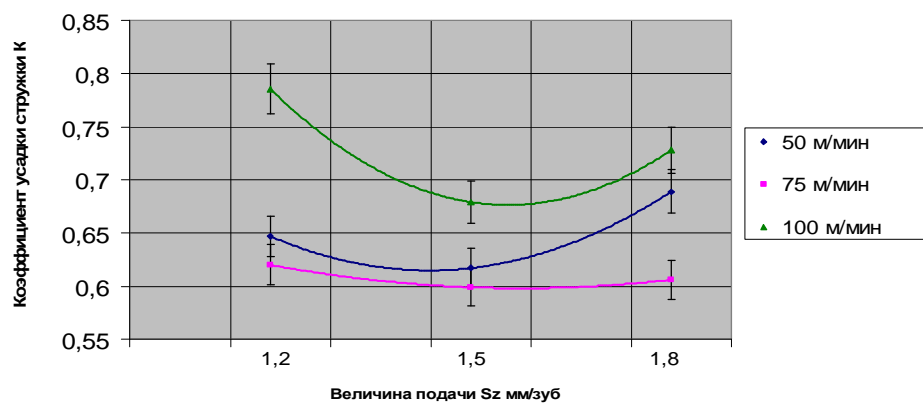


а

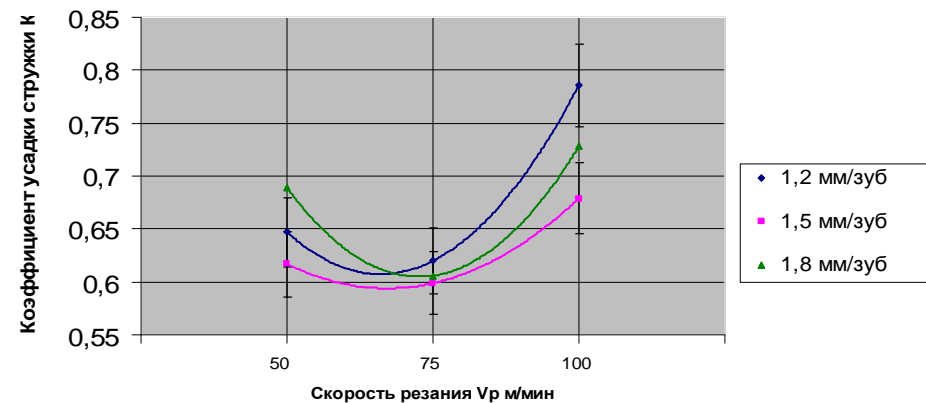


б

попутная схема подачи инструмента



в



г

встречная схема подачи инструмента

Рис. 8. Зависимость коэффициента усадки стружки от режимов резания а, в – зависимость коэффициента усадки стружки К от величины подачи S_z ; б, г – зависимость коэффициента усадки стружки К от скорости резания V_p ;

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермаков Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: библиотека технолога / Ю.М. Ермаков. М.: Машиностроение, 2005. 272 с.

2. Селиванов А.Н. Обеспечение качества обработки валов из титановых сплавов методом высокоскоростного фрезерования и фрезоточения / А.Н. Селиванов, Т.Г. Насад // Вестник СГТУ. 2010. №3 (46). Вып. 1. С. 55-61.

Селиванов Александр Николаевич – аспирант кафедры «Технология электрофизических и электрохимических методов обработки» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Selivanov Aleksander Nikolaevich – Postgraduate Student of the Department of «Technology of Electro-chemical and Electro-physical Processing Methods» of Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

Насад Татьяна Геннадиевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технология электрофизических и электрохимических методов обработки» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Nasad Tatiyana Gennadievna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Technology and Equipment of Electro-chemical and Electro-physical Processing Methods» of Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

Торманов Сергей Яковлевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология электрофизических и электрохимических методов обработки» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Tormanov Sergei Yakovlevich – candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Technology and Equipment of Electro-chemical and Electro-physical Processing Methods» of Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.9.06.08

Е.А. Сигитов, М.В. Виноградов

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ФРИКЦИОННЫХ ПЕРЕДАЧ ДЛЯ СВЕРХПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Рассмотрены состояние и перспективы применения многоступенчатых фрикционных передач для сверхпрецизионной обработки.

Фрикционная передача, сверхпрецизионная обработка, точность

E.A. Sigitov, M.V. Vinogradov

PERSPECTIVES OF APPLICATION OF MULTISTAGE FRICTION GEARS FOR SUPERPRECISION HANDLING

Are considered a condition and perspectives of application of multistage friction gears for superprecision handling

Friction gear, superprecision handling, exactitude

Сверхпрецизионной принято называть обработку, которая в данный период времени обеспечивает предельно возможную точность. По мере развития науки и техники верхний предел достижимой точности непрерывно повышается. В настоящее время стало возможным вести обработку с точностью размеров до 0,01 мкм. Шероховатость обработанной поверхности может составлять всего 0,001 мкм, т.е. 1 нм. Потенциально достижимая точность механической обработки со снятием стружки составляет 10 ангстрем [1]. По мере повышения верхнего предела точности сверхпрецизионной обработки повышается предел точности как «прецизионной», так и «нормальной» механической обработки. Возможность обработки со сверхпрецизионной точностью зависит от решения целого комплекса вопросов. Необходимо не только сверхпрецизионное оборудование, но и соответствующие режущий инструмент и измерительные средства. Многое зависит от свойств материала заготовки, режимов обработки, окружающей среды.

В современном автоматизированном прецизионном технологическом оборудовании и контрольно-измерительных машинах все более широко применяются многоступенчатые фрикционные передачи, позволяющие при определенных условиях обеспечить показатели точности, недостижимые с помощью других механических передач. Например, применение многоступенчатых фрикционных передач в металлорежущих станках (МРС) обеспечивает значительное упрощение кинематических цепей, высокий КПД (до 98%), отсутствие люфтов, приемлемую технологичность, низкий уровень вибраций, плавность перемещений [2].

Фрикционный электромеханический привод используется во многих сверхточных станках, в т.ч. уникальных. По принципу действия фрикционная передача, преобразующая вращение электродвигателя в поступательное движение рабочего органа, напоминает реечную передачу. Отличие заключается в том, что зацепление звеньев передачи осуществляется за счет сил трения. Подобные приводы применены, например, на станках мод. UDT-130В фирмы Toshiba (Япония) для точения мини-дисков [1].

Фрикционные приводы имеют высокую надежность и обеспечивают высокую точность и плавность перемещений. Фрикционными приводами оснащен один из самых крупногабаритных в мире станков модели LODTM (Large Optics Diamond Turning Machine) для алмазного точения металлических зеркал [1]. Каждый из приводов перемещений по оси X и Z станка имеет стальной ведущий ролик диаметром 50,8 мм, который находится в контакте с плоским стальным брусом шириной 25,4 мм, установленным на инструментальном ползуне или раме. При вращении ролика происходит перемещение бруса, т.е. вращательное движение преобразуется в поступательное. Если брус закреплен неподвижно на раме, то перемещается узел, в котором смонтированы опоры валика (суппорт). Обратная связь осуществляется с помощью лазерного интерферометра.

Изучение разработанных и принятых на государственном уровне стратегий структурной модернизации и развития автомобильной и аэрокосмической промышленности, а также конверсии оборонной промышленности показывает, что в соответствии с мировыми тенденциями развития технологии металлообработки и организации производства основу потреб-

ности этих отраслей будут составлять высокоточные автоматизированные виды оборудования для создания гибких быстропереналаживаемых производств. Освоение отечественными производителями указанных видов продукции не только позволит решить вопросы удовлетворения потребности и импортозамещения, но и явится базой для дальнейшего развития экспорта.

Условием повышения точности обработки являются стабильные (без автоколебаний) движения в технологических системах в соответствии с запроектированной кинематикой движения. Проблемы устойчивости технологических систем являются определяющими при проектировании и эксплуатации, особенно автоматизированных и автоматических технологических систем, так как устойчивость обеспечивает необходимую работоспособность системы, производительность труда, точность и качество поверхностей.

Системы автоматического управления по отклонению выходной величины содержат измерительные устройства для определения величины регулируемого параметра, усилительные устройства для преобразования и усиления сигналов рассогласования, исполнительный механизм для автоматической компенсации возникающих погрешностей обработки. Особенности обработки резанием приводят к значительным трудностям при создании измерительного устройства и исполнительного механизма. Эти трудности обуславливаются большой шероховатостью обработанной поверхности, значительными окружными скоростями детали и силами резания, необходимостью защиты приборов от стружки, невозможностью использования уже имеющихся штатных узлов станка для исполнительного механизма.

Необходимо отметить некоторые основные особенности процессов обработки резанием как объекта автоматического управления:

- многофакторность процесса, т.е. наличие большого числа возможных управляющих воздействий и выходных параметров;
- нелинейность большинства характеристик связи между входными и выходными переменными процесса и отсутствие между ними строгих аналитических зависимостей;
- нестационарность статических и динамических характеристик процесса;
- неконтролируемость ряда выходных параметров из-за отсутствия конструкций соответствующих измерительных преобразователей;
- наличие технологических и технических ограничений на действие управляющих воздействий;
- высокий уровень помех при измерении некоторых переменных, обусловленный наличием сходящей стружки, СОЖ, вибрациями узлов технологической системы.

Перечисленные особенности должны учитываться при разработке специальных технических диагностирующих и управляющих средств.

Переход к работе станков в режим безлюдной технологии, т.е. без непосредственного участия человека в технологическом процессе, а только в качестве наблюдающего за состоянием станков невозможен без использования систем, управляющих процессом резания, по крайней мере, по параметрам точности и стабильности технологических операций.

Таким образом, системный подход к проблеме качества заключается в комплексном решении задач нелинейной механики металлорежущих станков, моделировании и управлении точностью процессов резания.

Развитие нанотехнологий потребовало от станкостроителей создания принципиально нового сверхпрецизионного металлообрабатывающего оборудования. Современные параметры, обеспечиваемые сверхпрецизионной обработкой резанием: точность обработки 0,01-1 мкм; шероховатость обработанной поверхности $Ra=0,001$ мкм. Для деталей электронной и аэрокосмической промышленности точность обработки еще выше (0,005-0,1 мкм).

Для более точного исследования вышеуказанной проблемы необходимо учитывать влияние упругого звена, образованного ротором двигателя и присоединенной к валу инерци-

онной нагрузкой. Динамическую систему момент инерции двигателя – вал двигателя – момент инерции нагрузки можно представить системой с упругой связью. Жесткость конструкции приводов, предназначенных для работы в широкой полосе пропускания частот, должна определяться с учетом устойчивости системы электропривода.

Основные требования к современным станочным электроприводам сводятся к обеспечению необходимого диапазона и точности регулирования частоты вращения исполнительного двигателя, снижению её неравномерности, получению высоких динамических характеристик. Для повышения качества обработки деталей на металлорежущих станках необходимо обеспечить равномерное перемещение в широком диапазоне регулирования скорости механизмов подачи. При работе электропривода механизма подачи на низких частотах вращения к валу электродвигателя прикладывается нагрузка в виде момента сухого трения, ухудшающая его равномерность движения.

Качество привода подачи во многом определяет качество обработанных поверхностей. Оценка качества привода на стадии проектирования и отладки позволяет выявить его слабые стороны и учесть их возможное влияние на процесс обработки.

Традиционно для управления подачей в прецизионном станке используют приводы на основе шариковых винтовых пар (ШВП). Такие приводы находятся на пределе своих возможностей. Тем более не приходится ожидать высокой точности позиционирования, если в кинематической цепи привода, основанной на ШВП, присутствуют ременная или зубчатая передачи. На точности также очень сильно сказывается большая инерционность всего привода. При каждой остановке движения в ШВП присутствуют нежелательные деформации частей привода. Они приводят к износу сопрягаемых элементов в процессе эксплуатации и потере исходной точности. Следует заметить, что ремонт изношенного привода ШВП или замена его на новый – процедура крайне сложная и, что самое важное, очень дорогая. Её некачественное проведение может значительно снизить получаемую точность. ШВП имеет свои пути эволюции. Так, например, для ликвидации зазоров в соединении винта с гайкой вводятся специальные устройства натяга соединения. Ходовые винты особо точных станков изготавливают по классу эталонных, погрешности шага винтов пытаются скомпенсировать системами компенсаторов, в борьбе с температурными деформациями создаются невероятно сложные системы охлаждения и т. д. Но даже при таком обилии средств борьбы с недостатками приводов ШВП невозможно серьёзно улучшить их эксплуатационные свойства.

Наиболее существенным недостатком линейных приводов является низкое тяговое усилие. Повышение мощности, подаваемой на обмотки статора, как правило, приводит к незначительному увеличению тягового усилия и к значительному перегреву обмоток, что негативно сказывается на ресурсе линейного двигателя и точности перемещений. Выходом из этой ситуации становится установка нескольких ЛД для организации движения по одной оси.

В ряде работ рассматривались вопросы точностных характеристик приводов подачи, однако в приложении к прецизионной токарной обработке малогабаритных деталей с использованием многоступенчатых фрикционных передач (МФП) в приводах подачи они требуют более детального рассмотрения. Применяемый в токарных модулях ТПАРМ-100 привод подачи имеет в своей основе многоступенчатую фрикционную передачу, содержащую фрикционный редуктор и фрикционную передачу ролик-шток для преобразования вращательного движения в поступательное [2]. Использование жесткой обратной связи позволяет свести статическую ошибку к величине, определяемой разрешающей способностью лазерного интерферометра, используемого в качестве датчика обратной связи в приводе подачи модуля (рис. 1). Величина скольжения зависит от параметров МФП (перекос осей и т.п.), которые в процессе работы меняются незначительно, и от величины передаваемого момента [3]. Очевидно, что величина скольжения не может быть определена на стадии проектирования и учтена для каждого конкретного случая. Таким образом, реальные условия работы МФП делают её амплитудные характеристики неста-

бильными, причем в режиме резания наибольшее воздействие на изменение характеристик будет оказывать сила резания, поведение которой носит существенно нелинейный характер. Количественная оценка общей связи силы резания со скольжением не представляется возможной, поэтому математическую модель, описывающую динамические процессы в МФП, можно составить только для определенных областей режимов работы, где возможно делать определенные допущения. При составлении расчетной схемы обычно скорости всех элементов приводят к одной скорости, чаще всего к скорости входного вала [3].

Приведение i -го элемента, движущегося с угловой скоростью w_i к скорости w_1 осуществляется по формулам

$$J_{npi} = J_i / i_{li}^2, \quad (1)$$

$$l_{npi} = l_i \cdot i_{li}^2, \quad (2)$$

где $i_{li} = w_1/w_i$ – передаточное число от вала приведения к i -му валу передачи; l – податливость, J – момент инерции.

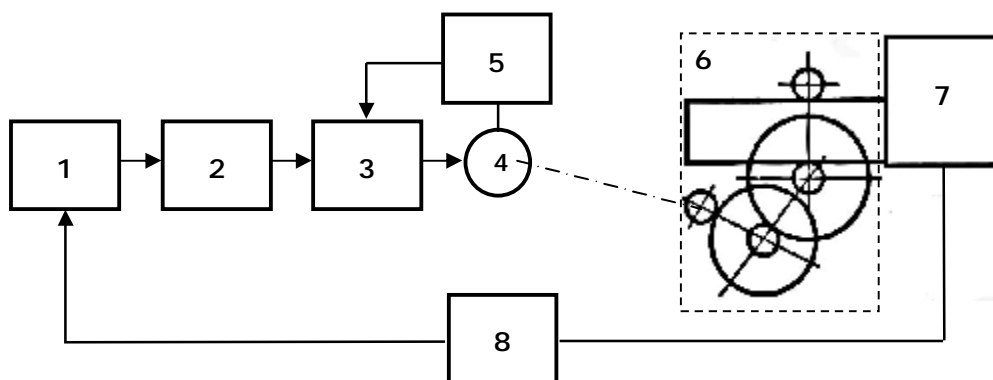


Рис. 1. Функциональная схема привода подачи: 1 – УЧПУ; 2 – регулятор положения; 3 – регулятор скорости; 4 – двигатель привода подачи; 5 – тахогенератор; 6 – фрикционная передача; 7 суппорт; 8 – лазерный интерферометр

Предварительный анализ показал, что предельная частота привода ограничена величиной 20 Гц, то есть низкочастотным диапазоном. Это дает возможность свести расчетную схему (рис. 1) к трехмассовой системе с упругодемпфирующими связями. Эквивалентные (приведенные) коэффициенты демпфирования h_{np} рассчитываются как при последовательном соединении элементарных звеньев

$$\frac{1}{h_{np}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i}, \quad (3)$$

где h_i – коэффициент демпфирования i -го звена.

Анализ трехмассовой системы рассмотрен в [3]. С учетом демпфирующих связей (скольжения) модель МФП можно представить в виде системы уравнений

$$\begin{cases} M - M_{c1} - M_{12} = J_1 p w_1, \\ M_{12} - M_{c2} - M_{23} = J_2 p w_2, \\ M_{23} - M_{c3} = J_3 p w_3, \end{cases} \quad (4)$$

где M_{12} , M_{23} – момент упругого взаимодействия между массами $J_1 - J_2$ и $J_2 - J_3$

$$\begin{aligned} M_{12} &= h_1 (w_1 - w_2) + c_1 (j_1 - j_2), \\ M_{23} &= h_2 (w_2 - w_3) + c_2 (j_2 - j_3). \end{aligned} \quad (5)$$

M_{c1} , M_{c2} , M_{c3} – моменты сопротивления, действующие соответственно на массы J_1 , J_2 , J_3 .

На основании уравнений движения структурная схема привода с МФП будет иметь вид, представленный на рис. 2.

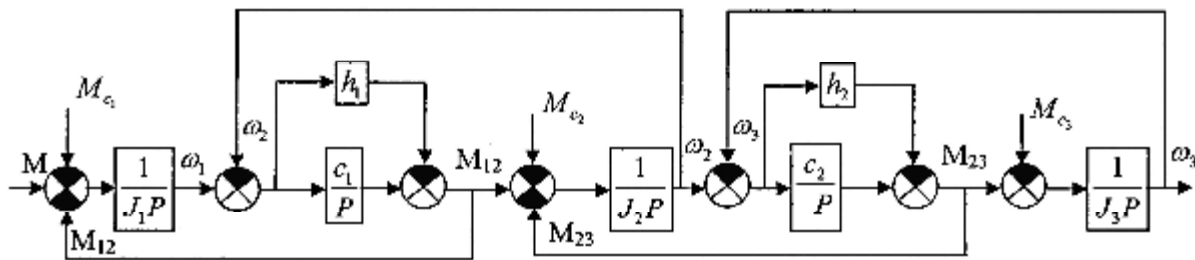


Рис. 2. Структурная схема привода с МФП

Преобразовав структурную схему, получим передаточную функцию механической части привода по управляющему воздействию при выходной переменной $w_3(p)$ (6)

$$Ww_3(p) = w_3(p)/M(p) = [h_1h_2p^2 + (c_1h_2 + c_2h_1)p + c_1c_2]/p[J_1J_2J_3p^4 + \{J_1h_2(J_2 + J_3) + J_3h_1(J_1 + J_2)\}p^3 + \{J_1c_2(J_1 + J_3) + J_3c_1(J_1 + J_2) + h_1h_2(J_1 + J_2 + J_3)\}p^2 + (c_1h_2 + c_2h_1)(J_1 + J_2 + J_3)p + c_1c_2(J_1 + J_2 + J_3)] \quad (6)$$

Электрическая и механическая части привода объединяются в единую электромеханическую систему электромеханической связью, благодаря которой движение механической части, вызванное воздействием момента двигателя, оказывает, в свою очередь, влияние на момент двигателя.

Экспериментальная проверка точности обработки заданных перемещений приводом подачи с трехступенчатой фрикционной передачей, имеющей передаточное отношение $i=100$, показала, что текущая суммарная погрешность позиционирования суппорта токарного прецизионного модуля ТПАРМ-100 при величине перемещения 10 мм составляла $0,2 \pm 0,2$ мкм, что соответствует относительной погрешности 0,002%.

Измерения проводились путем контроля повторяемости перемещения суппорта по программе в заданные точки с помощью датчика Minicom (Япония) с ценой деления 0,1 мкм. Конструкция модуля включает МФП, лазерный интерферометр, газовые направляющие суппорта. Анализ результатов показал высокую повторяемость перемещений, поскольку среднее значение отклонения перемещения от заданного не превышало 0,2 мкм, а СКО среднего – 0,1 мкм [2, 3].

Аналогичные измерения проведены и на модулях ТПАРМ-100М и ТПАРМ-80, причем в регламентированных температурных условиях до $20 + 0,5^\circ\text{C}$. Результаты измерений свидетельствуют, что на упомянутых ТМ повторяемость перемещения суппорта составила 0,1...0,2 мкм при СКО 0,1 мкм; указанное соответствует требованиям к приводам подачи для обеспечения точности обработки по 1...2 квалитетам. МФП в приводах прецизионных токарных станков позволяют снизить нелинейности, связанные с особенностями зубчатых передач, и обеспечить возвратно-поступательные перемещения рабочего органа с частотой до 20 Гц (в режиме стружкодробления) с нанометровой точностью.

Использование лазерного интерферометра в качестве датчика перемещений и скорости позволяет значительно уменьшить влияние скольжения МФП на линейность характеристики привода. Если без обратной связи скольжение зависит от конструкции МФП и передаваемого момента и колеблется в пределах 0,002...0,6% [5], то в замкнутой системе его величина стремится к нулю.

Полученные в результате моделирования на ЭВМ переходные процессы для заданных значений параметров привода и при различных значениях передаточного отношения МФП показали, что привод подачи с МФП с учетом ввода корректирующего звена (интегрирующего) с передаточной функцией $W_k(p)$ обеспечивает высокое быстродействие и повышение точности позиционирования с увеличением передаточного отношения МФП. Экспе-

риментальная проверка возможности использования МФП для достижения нанометровой точности проводилась путем установки на модуль ТПАРМ двух последовательно соединенных трехступенчатых фрикционных передач с общим передаточным отношением 10000. Такое исполнение привода с коэффициентом передачи 6 мкм на оборот входного вала обеспечивало дискретность задания перемещения - 0,01-0,025 мкм [4]. Результаты эксперимента подтвердили возможность использования МФП в приводах подачи сверхпрецизионных станков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Н.А. Состояние и перспективы развития технологии и оборудования для сверхпрецизионной обработки: аналитический обзор / Н.А. Петров. М.: ВНИИТЭМР, 1991. 44 с.
2. Игнатъев А.А. Привод подачи с многоступенчатой фрикционной передачей для прецизионного токарного ГПМ / А.А. Игнатъев, М.В. Виноградов, Е.А. Сигитов // СТН. 2004. № 11. С. 7-12.
3. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков. Ч. 3 / А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, М.В. Виноградов, В.В. Бондарев, В.В. Горбунов. Саратов: СГТУ, 1999. 124 с.
4. Виноградов М.В. Обеспечение нанометровой точности формообразующих перемещений рабочих органов прецизионных автоматизированных станков: монография / М.В. Виноградов, А.А. Игнатъев, Е.А. Сигитов. Саратов: СГТУ, 2011. 102 с.

Сигитов Евгений Александрович – кандидат технических наук, директор ЗАО «НПК Прецизионного оборудования», г. Саратов

Sigitov Evgenie Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, the Director of Joint-Stock Company «NPK the Precision equipment», Saratov

Виноградов Михаил Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Vinogradov Michael Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of chair «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 04.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 629.621.018.66

К.Л. Слитников, И.К. Данилов, А.П. Беликов

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕМОНТНЫХ ЦИКЛОВ ДВС И ОЦЕНКА ИХ ТРУДОЕМКОСТИ СЕТЕВЫМИ МЕТОДАМИ

Рассматривается планирование ремонтных циклов ДВС сетевыми методами, учитывающими параллельные процессы восстановления работоспособности. Обосновывается экспоненциальный характер трудоемкости ремонтных воздействий, которая может использоваться при оценке ремонта нормо-часами.

Сеть, система, сервис, ДВС, цикл, метод

K.L. Slitnikov, I.K. Danilov, A.P. Belikov

ICE (INTERNAL-COMBUSTION ENGINE) SERVICE CYCLES SIMULATION AND THEIR WORKING HOURS EVALUATION BY NETWORK METHODS

The article describes ICE service cycles simulation by network methods, which also take into consideration efficacy renewal. It is reasoned that the exponential character of working hours can be used while evaluating service by standard hours. Key boards: network, system, service, ICE, cycle, method.

Network, system, service, ICE, cycle, method

Восстановление работоспособности ДВС (как системы) можно считать параллельным процессом, так как оно связано с ремонтом цилиндропоршневой группы (ЦПГ), кривошипно-шатунного механизма (КШМ), системы питания, смазки (компонентов).

Взаимодействие компонентов системы можно описывать в непрерывном времени дифференциальными уравнениями, в дискретном – уравнениями в конечных разностях и нерегулярном (событийном) времени, когда время отсчитывается лишь в моменты происхождения событий, изменяющих состояние. Последний способ характерен для процесса восстановления работоспособности ДВС, он наиболее экономичный, но и непростой с точки зрения аналитического описания. Наиболее мощные инструменты здесь – имитационные модели и сети Петри как основа этих моделей.

Моделируемая система представляется совокупностью компонентов, обладающих собственными состояниями. Смена состояний может осуществляться заменой детали, регулировкой или другого внутреннего для системы фактора. Таким образом, с точки зрения взаимодействия элементов системы не все их состояния равнозначны. Целесообразно выделить среди них три класса состояния [1]: системные, сопряженные, внутренние. Состояния первого класса существенны для планирования ремонтных циклов ДВС. Это некоторая совокупность сопряженных состояний систем и механизмов ДВС, находящихся под воздействием внешних факторов – производственных условий восстановления работоспособности. Под сопряженными будем понимать смежные состояния элементов (деталей), через которые осуществляется их взаимодействие.

Изменение внутренних состояний системы или механизма ДВС отражается непосредственно на функционировании других систем, эти состояния важны лишь с точки зрения исследования их технического состояния. Исследуемая система представляет собой совокупность процессов, которая в терминах динамического моделирования может быть описана в виде последовательностей взаимодействия с элементами смежных объектов системы. Обозначим через S_i , $i = 1, 2, \dots, r$ элементы исследуемой системы, сами являющиеся элементарными динамическими системами. Внутренние состояния систем и механизмов ДВС S_i обозначим $x^i_1, x^i_2, \dots, x^i_r$. В данном случае можно говорить о динамизации графовой статической модели системы (ДВС) через динамические системы S_i (смазки, питания, КШМ, ЦПГ). Модель приведенной системы может быть получена средствами языков программирования и обширного программного обеспечения. Кроме того, здесь важен порядок (последовательность) изменения состояния систем. Моделирование процессов можно осуществить, приписывая каждому состоянию x^i_k специальный параметр порядка, то есть рассматривая расширенное состояние (x^i_k, v^i_k) , $k = 1, \dots, n_i$ и упорядочивая параметры v^i_k . Пример упорядочения – предписывание порядка по v^i_k в соответствии с заданной последовательностью и системой приоритетов.

Если ввести в рассмотрение системы соотношений над множеством $\{v^i_k\}$, $i = 1, \dots, r$, $k = 1, \dots, n_i$ определяющие порядок осуществления событий в системе синхронизаторы, то получим еще один способ генерации состояний.

Здесь $a^j_i \geq 0$ – параметр, имеющий смысл времени простоя перед обработкой на i -й единице оборудования. Многомерная диаграмма Ганта описывается в этом случае системой, где неравенство-произведение введено для реализации условия не пересечения:

$$\begin{aligned} y^j_i &= y^j_{i-1} + a^j_i + T^j_i, \\ (a^j_i - y^k_i)(a^k_i - y^j_i) &\leq 0, \\ i &= 1, \dots, n; j = 1, \dots, r; a^j_i \geq 0, y^j_0 \equiv 0. \end{aligned} \quad (2)$$

МДГ, по сути, является моделью, представляющей процесс функционирования ремонтных циклов ДВС. Для аналитического решения задачи оптимального планирования (в том числе оптимальной последовательности восстановления работоспособности ДВС) задача сводится к минимизации целевой функции.

Кроме того, для аналитического описания параллельных процессов восстановления систем ДВС вводится понятие дискретной диаграммы Ганта. Для этого произведем подетальную дискретизацию времени, в котором рассматривается трудоемкость при обработке j -й детали, полагая $t^j = 0, \Delta^j, 2\Delta^j, \dots$. Определим шаг Δ^j как наибольший общий делитель (НОД) целых чисел $T^j_i, i = 1, \dots, r_j$, где r – число единиц оборудования, на которых обрабатывается j -я деталь.

$$\Delta^j_i = \text{НОД}(T^j_1, \dots, T^j_{r_j}). \quad (3)$$

Тогда m^j_i – время обработки j -й детали на i -й единице оборудования, выраженное в единицах:

$$m^j_i = T^j_i / \Delta^j. \quad (4)$$

Для связи временных шкал t^j определим шаг дискретизации Δ , общий для всех r деталей:

$$\Delta^j_i = \text{НОД}(\Delta^1, \dots, \Delta^r). \quad (5)$$

Соответственно $m^j_i = T^j_i / \Delta^j$ есть длительность обработки j -й детали на i -й единице оборудования, выраженная в реальном времени системы. В каждый момент времени n компонент ДВС по отношению к j -й детали находится в некотором состоянии $x^j_i(n)$. Это состояние для всех компонент ДВС в n -й момент времени всех единиц оборудования системы, участвующих в восстановлении ДВС:

$$x^j(n) = \{x^j_1(n), \dots, x^j_{r_j}(n)\}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

Для компьютерного моделирования необходимо осуществить «развертку» во времени векторов x^j_i , используя $x^j_i(n)$ в качестве внутренних состояний системы. Используя динамические циклические модели [3] для генерации последовательности состояний, представим состояние элемента системы в момент времени n в виде

$$x^j_i(n) = \exp(\Pi n i / 2), n = 0, 1, 2, \dots \text{ где } i = \sqrt{-1} \quad (7)$$

С учетом обработки на i -й единице оборудования j -й детали с помощью введенного выше числа m^j_i и времени ожидания a^j_i состояние $x^j_i(n)$ можно представить в виде

$$x^j_i(n) = c^j_i \exp(2\Pi_i (n - a^j_i) : m^j_i) + a^j_i, n = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Таким образом, сетевое планирование позволяет планировать и оптимизировать структуры ремонтных циклов, а трудоемкость должна определяться не алгебраической суммой трудоемкостей каждой из них, а несколько меньшим экспоненциальным увеличением за счет параллельности процесса восстановления ДВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лескин А.А. Сети Петри в моделировании и управлении / А.А. Лескин, П.А. Мальцев, А.М. Спиридонов. М.: Наука, 1989. 133 с.
2. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем / Д. Питерсон. М.: Мир, 1984. 263 с.
3. Котов В.Е. Сети Петри / В.Е. Котов. М.: Наука, 1984. 160 с.

Слитников Константин Леонидович – аспирант кафедры «Автомобили и двигатели» Саратовского государственного технического университета

Данилов Игорь Кеворкович – доктор технических наук, доц., зав. кафедрой «Автомобили и двигатели» Саратовского государственного технического университета

Беликов Андрей Павлович – кандидат технических наук, доц. каф. «Автомобили и двигатели» Саратовского государственного технического университета

Slitnikov Konstantin Leonidovich – postgraduate student «Cars and Engines» of Saratov State Technical University

Danilov Igor Kevorkovich – doctor of technical sciences, head of the department of «Cars and Engines» of Saratov State Technical University

Belikov Andrey Pavlovich – candidate of technical sciences, docent of the department of «Cars and Engines» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 658.52.011

М.В. Туркин

МЕТОДИКА ГРУППИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЯЧЕЕК ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА

Рассматриваются принципы группирования деталей и производственного оборудования для построения производственных ячеек замкнутого цикла. Предлагаемый алгоритм применим для широкого спектра производственных ситуаций и позволяет оптимизировать группы деталей и оборудования согласно требуемым параметрам.

Групповая технология, гибкое производство, структурная оптимизация, группирование деталей

M.V. Turkin

MACHINE PART GROUPING METHODS FOR MANUFACTURING CELL FORMATION

This paper deals with the different machine part grouping methods for manufacturing cell formation. The proposed algorithm is applicable for a wide range of manufacturing environments. It allows to perform grouping based on the parameters that best reflect the production system requirements.

Group technology, flexible manufacturing, structural optimization, machine part grouping

Введение. Машиностроительная отрасль промышленности является основной движущей силой развития современной инновационной экономики, т.е. создания ориентированных на инновационную деятельность производственных систем, постановки на производство новой, конкурентоспособной продукции средствами разработки новых технологий, обеспе-

чивающих долгосрочное превосходство над продукцией вероятных конкурентов. Таким образом, современное машиностроительное производство может дать мощный импульс для сокращения сроков разработки научно-технической продукции для оборонных и гражданских отраслей промышленности «от идеи – до внедрения».

Значимость организационно-технологической структуры производственного процесса как важнейшего направления в построении производственной системы, в последние годы возросла. Во-первых, архитектура производственного процесса остается центральным звеном, определяющим темпы разработки и постановки новых изделий на производство. Во-вторых, организационная структура производственного процесса обеспечивает решение главных задач ускоренной постановки новой продукции на производство, быстрого завоевания предприятием-производителем определенного сегмента рынка и обеспечения прибыли. В-третьих, организационная структура производственного процесса определяет систему технологической подготовки производства (ТПП) которая, в свою очередь, играет ключевую роль в освоении новых (модифицированных наукоемких) изделий, внедрение которых на производство, как правило, сопровождается выполнением НИОКР по освоению новых материалов, технологий и оборудования.

От того, как будет построена структура производственно-технологического процесса зависит, в конечном счете, конкурентоспособность всей отечественной индустрии не только машиностроительного профиля, но и других отраслей народного хозяйства – потребителей машиностроительной продукции.

Все эти обстоятельства позволяют утверждать, что оптимизация структуры производственно – технологического процесса является в настоящее время центральной, системообразующей частью всего комплекса работ по выпуску высококачественных изделий, ускорению постановки новых изделий на производство и инновационному развитию машиностроительной отрасли в целом.

В настоящее время на большинстве предприятий машиностроительной отрасли РФ используется многоуровневая система организации производства, сложившаяся в 50-е годы прошлого столетия. Данная структура основана на административном делении производства на корпуса и входящие в них цеха. Цеха группируются по типу производств, таких как заготовительное, механическое, механосборочное, сборочное и т.д. В каждом отдельном цехе производственное оборудование группируется по общности служебного назначения. Таким образом, создаются отдельные участки из шлифовальных, фрезерных, токарных, сверлильных и других станков. При подобной организации производства изделия (заготовки) в зависимости от технологии изготовления последовательно проходят необходимые участки, на которых выполняются требуемые операции. По окончании операции изделие поступает на промежуточный склад, где находится до передачи на следующую операцию. После окончания обрабатывающих операций изделия направляются на склад готовой продукции, откуда поступают на агрегатную или окончательную сборку.

Данная архитектура производственного процесса имеет крайне сложную систему маршрутов перемещения изделий как между производственным оборудованием, так и между цехами в целом, что приводит к следующим последствиям для предприятия:

- сложность планирования и управления производственным процессом;
- длительные циклы изготовления изделий;
- большой объем незавершенного производства и длительный срок пролеживания деталей сборочных единиц между операциями;
- дублирование вспомогательных операций;
- потери при транспортировке изделий;
- необходимость в многоступенчатой системе ТПП.

Вышеперечисленные последствия существующей производственной структуры многократно усиливаются с увеличением сложности производимых изделий, так как увеличиваются количество требуемых технологических операций и точность их выполнения, что, в свою очередь, еще больше усложняет маршрут движения изделий.

Повышение эффективности производственных систем машиностроительных предприятий ОПК РФ возможно за счет перехода на модульный принцип организации производства вместо цехового.

Организация производства в каждом из производственных модулей построена по принципу производственных ячеек (ПЯ). Каждая из ПЯ представляет собой участок замкнутого производственного цикла, в котором технологическое оборудование расположено по ходу технологического процесса. Расположение оборудования по видам обработки согласно маршрутно-операционным технологическим процессам резко сокращает грузопотоки и обеспечивает кратчайшие пути прохождения ДСЕ через все этапы производственного цикла, что, в свою очередь, уменьшает объемы незавершенного производства (НЗП) и увеличивает коэффициент загрузки оборудования.

Обработка детали	Левая деталь	Переходы										Комплексная деталь	
		Обработка поверхности 1	Обработка поверхности 2	Обработка поверхности 3	Обработка поверхности 4	Центрирование отверстий 5	Сверление отверстий 6	Слесарная обработка 7	Получение торца 8	Обработка фаски 9	Чистовая обработка 10		
А		X											
Б		X	X					X	X				
В		X	X	X				X	X				
Г		X					X	X	X				
Д		X			X			X	X				
Ж		X			X	X		X	X				

Рис. 1. Матрица соответствия деталей и переходов

Существующие принципы группирования деталей и оборудования. В основе построения эффективного производства замкнутого цикла лежит определение групп производимых изделий и группировки соответствующего оборудования для их изготовления.

Митрофанов [1] и большинство отечественных исследователей подходили к проблеме группировки производимых изделий через использование матриц соответствия между деталями и соответствующими поверхностями или между деталями и технологическими переходами (см. рис. 1). Поскольку технологический переход является частью технологической операции, выполняемой одними и теми же средствами технологического оснащения, то использование его в качестве критерия группировки не позволяет привязать группы деталей к конкретным группам производственного оборудования.

Альтернативным подходом является применение классификаторов для формирования групп производимых деталей. В основе данного метода лежит принцип разделения множеств

где $x_{ij} = 1$, если единица оборудования i распределена в группу с ключевым оборудованием j и $x_{ij} = 0$ – в остальных случаях.

$$\begin{aligned} \sum_i x_{ij} &= 1, \forall j \\ \sum_j x_{ij} &= p, \\ x_{ij} &\leq x_{jj}, \forall i, j \\ x_{ij} &= 0 \text{ или } 1 \end{aligned}$$

Целевая функция (3) максимально увеличивает сумму подобий, что в свою очередь создает группы производственного оборудования. Практика показала отсутствие алгоритма, гарантирующего оптимальное решение данной задачи [4].

Существующие алгоритмы группирования деталей и оборудования полагаются сугубо на единственный критерий оценки – необходимость конкретной единицы оборудования для производства определенного изделия. Подобный подход не учитывает важнейшие производственные факторы, такие как объем производства, длительность производственного цикла, последовательность производственных операций и т.д.

Таким образом, очевидна необходимость в новом подходе к нахождению соответствия между группами изделий и необходимого для их производства оборудования.

Предлагаемый алгоритм группирования изделий и оборудования. Первым шагом предлагаемого алгоритма является построение матрицы соответствия деталей и оборудования по схеме предложенной Burbidge, J.L.

В следующем шаге необходимо рассортировать строки и колонки матрицы таким образом, чтобы выделились определенные группы деталей и оборудования необходимого для их производства. Другими словами перейти от хаотичного распределения к распределению 1 во взаимно исключающих группах по диагонали матрицы. Для этого каждой колонки i (с лева) присваивается вес $W_i = \sum_j a_{ij} \cdot w_j$, где a_{ij} – значение матрицы в точке, $w_i = 2^{(n-i)}$, а n – количество деталей.

В свою очередь, каждому ряду j (с верху) присваивается вес $W_j = \sum_i a_{ij} \cdot w_i$, где a_{ij} значение матрицы в точке, $w_j = 2^{(m-j)}$, а m – количество единиц оборудования.

$$\begin{matrix} \text{Исходная матрица соответствия} \\ \text{Исходная матрица соответствия} \end{matrix}$$

Далее необходимо переставить ряды и колонки из расчета уменьшающихся весовых значений (см. рис. 5).

$$\begin{matrix} \text{Матрица соответствия после сортировки рядов} \\ \text{Матрица соответствия после сортировки колонок} \end{matrix}$$

Рис. 5. Матрица соответствия после сортировки рядов и колонок

В особых случаях, когда определенные единицы оборудования являются узкими местами, т.е. используются многими деталями, необходимо применить вышеописанный алгоритм, так как если бы их не было, и добавить после сортировки.

Для оценки эффективности группирования предлагается использовать параметр:

$$\mu = q \times \frac{a}{b} + (1 - q) \times \frac{c}{d},$$

где a – количество 1 в диагональных блоках; b – максимально возможное количество 1 в диагональных блоках; c – количество 0 вне диагональных блоков; d – максимально возможное

количество 0; q – коэффициент, принимающий значение от 0 до 1 в зависимости от размера матрицы соответствия.

Для матрицы соответствия с рис. 5 коэффициент эффективности группирования равен:

$$\mu = 0,5 \times \frac{13}{17} + (1 - 0,5) \times \frac{18}{18} = 0,88$$

При расстановке оборудования по ходу технологического процесса важной является проблема синхронизации времени цикла каждой из операций. В связи с этим следующим шагом в предлагаемом алгоритме группирования является простановка в матрице соответствия значений трудоемкости обработки каждой детали на каждой единице оборудования (см. рис. 6).

Рис. 6. Матрица соответствия со значениями циклов обработки

После этого становятся видны те единицы оборудования, которые определяют «такт» производственного процесса. На примере матрицы соответствия на рис. 6 видно, что единица оборудования под номером 2 является узким местом, определяющим пропускную способность данной производственной ячейки. Таким образом, для синхронизации производственного цикла ячейки необходимо провести параметрическую оптимизацию режимов обработки на оборудовании 2 с целью снижения времени обработки. Альтернативой при высоких объемах производства является приобретение дополнительной единицы такого же оборудования для параллельной обработки деталей.

При широкой номенклатуре производимых изделий важным становится время переналадки оборудования от одного типа деталей к другим. Таким образом, в построенную на первом шаге матрицу соответствия необходимо внести значения времени переналадки каждой единицы оборудования для каждой детали, которая на него попадает.

В случаях когда невозможно построить взаимноисключающие группы оборудования и, как следствие, требуется использование оборудования из других производственных ячеек, становится важным учитывать объем межъячеечного передвижения деталей. Для этого в матрицу соответствий вносятся значения производственных объемов за определенный период времени для каждой единицы оборудования. В получившейся матрице критерием оптимизации становится объем межъячеечного производства.

Заключение. Построение производственных ячеек замкнутого цикла в условиях высоко-технологичного, широкономенклатурного, мелкосерийного производства осложняется отсутствием эффективной методики группирования выпускаемых деталей и оборудования. Представленный в данной работе алгоритм группирования имеет возможность оптимизации по различным параметрам в зависимости от особенностей существующего производства путем внесения критических показателей в матрицу соответствия. Таким образом, преимуществом представленного в данной работе алгоритма перед уже существующими является его гибкость, так как он может быть подстроен под широкий спектр производственных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства / С.П. Митрофанов. Л.: Машиностроение, 1983. 407 с.
2. Burbidge J.L. Production flow analysis / J.L. Burbidge // Production Engineer, 50, 139-152, 1971.
3. Kusiak A. The generalized group technology concept / A. Kusiak // International Journal of Production Research, 25, 561-569, 1987.
4. Srinivasan, G. Nonhierarchical clustering method for the group technology problem / G. Srinivasan, T.T. Narendran // International Journal of Production Research, 29, 463-478, 1991.

5. Shargal M. Evaluation of search algorithms and clustering efficiency measures for machine-part matrix clustering / M. Shargal, S. Shekhar, S.A. Irani // IE Transactions, 27, 43-59 (1995).

Туркин Михаил Владимирович –
начальник технологического бюро ФГУП
«НПЦ газотурбостроения «Салют»,
г. Москва

Turkin Mikhail Vladimirovich –
head of production engineering office FSUE
«Gas-turbine engineering research
and production center «Salut», Moscow

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.924.93

В.В. Шпилев, М.К. Решетников

**ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ
НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ,
ЕЁ ТВЕРДОСТЬ, ОВАЛЬНОСТЬ И КОНУСООБРАЗНОСТЬ**

Приведены проведенные авторами экспериментальные исследования в области гидроабразивной резки, описано влияние подачи режущей головки, твердости обрабатываемого материала и расхода абразива на шероховатость обработанной поверхности, её твердость, конусообразность и овальность.

Гидроабразивная резка, математическая модель

V.V. Shpilev, M.K. Reshetnikov

**IMPACT OF ON WATERJET CUTTING ROUGHNESS OF THE MACHINED SURFACE,
ITS HARDNESS, OVAL AND CONICAL**

The article presents the authors conducted experimental research in the field of waterjet cutting, filing describes the effects of the cutting head, the hardness of the material flow and abrasive roughness of the machined surface, its hardness, taper and roundness.

Waterjet cutting, the mathematical model

Метод гидроабразивной резки – альтернатива не только механической, но и лазерной, плазменной, электроискровой и кислородной резке, а при необходимости обработки материалов, не терпящих температурного воздействия, является единственно возможным и наиболее эффективным и универсальным из родственных методов. Следует отметить, что до настоящего времени теории струйной гидроабразивной обработки, охватывающей все стороны процесса, еще не существует, поэтому исследование этого процесса представляет определенный научный интерес.

Экспериментальные исследования процесса гидроабразивной резки проводились с целью технико-экономического обоснования использования этого процесса взамен существующей технологии. Основная часть экспериментов проводилась на базе ФГУП «Саратовский агрегатный завод» (ФГУП «САЗ») и Саратовского государственного технического университета (СГТУ).

Для получения математической модели процесса гидроабразивной резки использовали метод полного многофакторного эксперимента. За параметры оптимизации приняли шероховатость обработанной поверхности R_a , отклонение от овальности $\Delta_{ов}$ обработанной поверхности и отклонение от конусообразности $\Delta_{кон}$ обработанной поверхности, а за факторы взяли твердость материала заготовки T , расход абразива Q и подачу S . В методике исследований были приняты интерполяционные модели, которые выражают степенную зависимость выходных параметров от регулируемых факторов процесса.

Исследования проводились на установке гидроабразивной резки ЧПУ (CNC) с осями X-Y, тип WJxxyyB-nZ-D. Станок WJxxyyB-nZ-D – это координатный режущий станок, несущий технологические головки водной струи сверхвысокого давления или водоабразивной струи сверхвысокого давления. Шероховатость обработанной поверхности определяли на профилометре «Абрис ПМ7», отклонение от овальности и конусообразности обработанной поверхности определяли при помощи микрометра МК 0-25 мм (0.01) кл.1. При исследовании использовались заготовки из стали 30ХГСА и стали 20.

После обработки результатов экспериментов получили следующие математические модели:

$$\left. \begin{aligned} R_a &= 4.817Q^{1.23}T^{-0.199}S^{0.207} \\ \Delta_{ов} &= 0.122Q^{0.0013}T^{-0.004}S^{0.001} \\ \Delta_{кон} &= 0.475Q^{0.0031}T^{-0.033}S^{0.01} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где R_a – шероховатость обработанной поверхности; $\Delta_{ов}$ – отклонение от овальности обработанной поверхности; $\Delta_{кон}$ – отклонение от конусообразности обработанной поверхности; Q – расход абразива; T – твердость материала заготовки; S_i – подача режущей головки.

Анализ полученных зависимостей показал, что значение шероховатости обработанной поверхности увеличивается по мере возрастания скорости резания, точнее подачи режущей головки. Шероховатость становится более грубой, увеличивается угол конуса, в нижней части сечения материала появляется борозда (рис. 1).

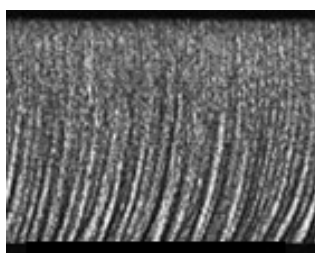
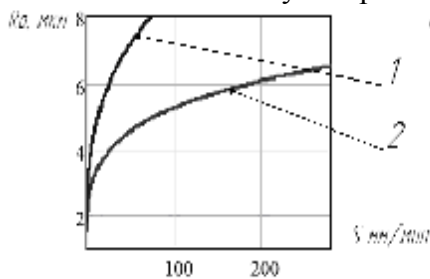


Рис. 1

Особое влияние на шероховатость оказывает количество абразива в водяной струе, что объясняется наличием вкраплений единичных частиц абразива в плоскости реза и на лицевой поверхности обрабатываемой детали. С чрезмерным увеличением количества абразива в водяной струе число вкраплений резко возрастает, частицы не могут беспрепятственно покидать место реза, в щели резания образуется «подушка» из абразивных частиц, эффективность обработки снижается, увеличивается значение шероховатости. Также известно, что чем выше твердость обрабатываемой стали, тем меньше высота микронеровностей, следовательно ниже значение шероховатости.

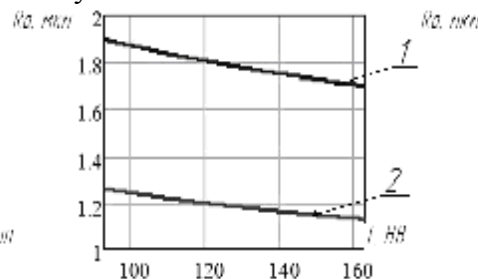
Построены соответствующие графики, демонстрирующие зависимости шероховатости R_a , отклонение от овальности $\Delta_{ов}$ обработанной поверхности, отклонение от конусообразности $\Delta_{кон}$ обработанной поверхности от подачи S , твердости материала T , расхода абразива Q (рис. 2-10).

Анализируя зависимости отклонения от овальности и конусообразности, можно увидеть, что в приблизительно равной степени с увеличением подачи и количества абразива в абразивной струе увеличивается значение отклонения от формы обрабатываемой поверхности, связанное с ухудшением условий резания, увеличивается разброс абразивных частиц, снижаются режущие свойства инструмента, а с повышением твердости значения отклонения от овальности и конусообразности уменьшаются.



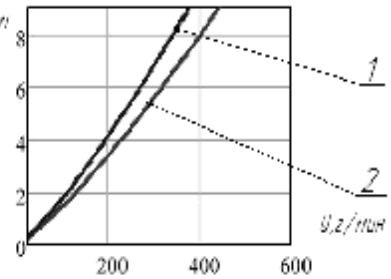
Забиточность 1: $Q=600$ г/мин, $T=163$ НВ
Забиточность 2: $Q=30$ г/мин, $T=93$ НВ

Рис. 2. Зависимость шероховатости R_a от подачи S



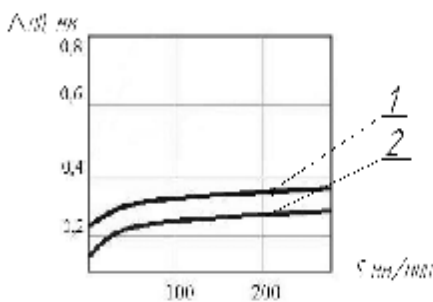
Забиточность 1: $Q=600$ г/мин, $S=279$ мм/мин
Забиточность 2: $Q=30$ г/мин, $S=3$ мм/мин

Рис. 3. Зависимость шероховатости R_a от твердости материала T



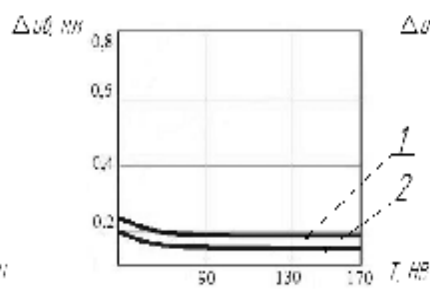
Забиточность 1: $T=163$ НВ, $S=279$ мм/мин
Забиточность 2: $T=93$ НВ, $S=3$ мм/мин

Рис. 4. Зависимость шероховатости R_a от расхода абразива Q



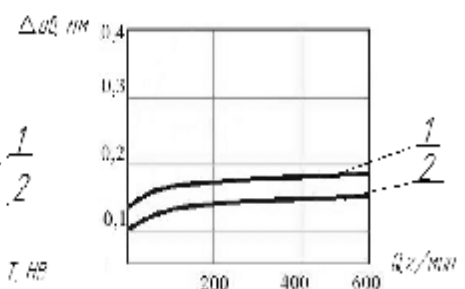
Забиточность 1: $Q=600$ г/мин, $T=163$ НВ
Забиточность 2: $Q=30$ г/мин, $T=93$ НВ

Рис. 5. Зависимость отклонения от овальности Δ_{ov} обработанной поверхности от подачи S



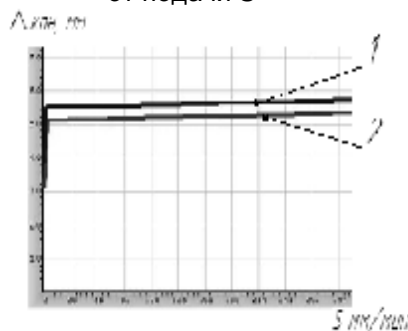
Забиточность 1: $Q=600$ г/мин, $S=279$ мм/мин
Забиточность 2: $Q=30$ г/мин, $S=3$ мм/мин

Рис. 6. Зависимость отклонения от овальности Δ_{ov} обработанной поверхности от твердости материала T



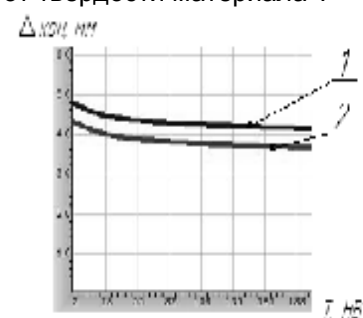
Забиточность 1: $T=163$ НВ, $S=279$ мм/мин
Забиточность 2: $T=93$ НВ, $S=3$ мм/мин

Рис. 7. Зависимость отклонения от овальности Δ_{ov} обработанной поверхности от расхода абразива Q



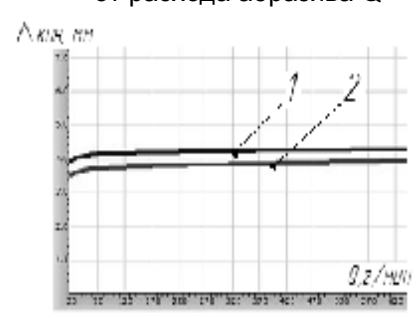
Забиточность 1: $Q=600$ г/мин, $T=163$ НВ
Забиточность 2: $Q=30$ г/мин, $T=93$ НВ

Рис. 8. Зависимость Отклонения от конусообразности $\Delta_{кон}$ обработанной поверхности от подачи S



Забиточность 1: $Q=600$ г/мин, $S=279$ мм/мин
Забиточность 2: $Q=30$ г/мин, $S=3$ мм/мин

Рис. 9. Зависимость Отклонения от конусообразности $\Delta_{кон}$ обработанной поверхности от твердости материала T



Забиточность 1: $T=163$ НВ, $S=279$ мм/мин
Забиточность 2: $T=93$ НВ, $S=3$ мм/мин

Рис. 10. Зависимость Отклонения от конусообразности $\Delta_{кон}$ обработанной поверхности от расхода абразива Q

ЛИТЕРАТУРА

1. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. РДМУ 109-77. М.: Изд-во стандартов, 1978. 63 с.

Шпилев Василий Владимирович – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Shpilev Vasily Vladimirovich – post-graduate faculty «Technology of mechanical engineering» Saratov State Technical University

Решетников Михаил Константинович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Reshetnikov Mihail Konstantinovich – doctor of technical sciences, professor of chair «Manufacturing Engineering», Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 23.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.924.93

В.В. Шпилев, М.К. Решетников, Н.Н. Берёда

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКРУЧИВАЕМОЙ АБРАЗИВНОЙ СТРУИ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОМ РЕЗАНИИ

Проведены теоретические исследования активной границы сверхзвуковой двухфазной струи. Для увеличения режущей способности гидроабразивной струи, предложено закручивать её в смесительной трубке путем нарезания спиралеобразной канавки. Предложены поправки в законы распространения жидкостной струи круглого сечения, учитывающие её закручивание. Получена зависимость расширения диаметра струи в зависимости от расстояния до поверхности контакта струи с материалом, расхода абразивных частиц и от диаметра сопла.

Гидроабразивная резка, закручивание струи, двухфазный поток

V.V. Shpilev, M.K. Reshetnikov, N.N. Bereda

MODELING TWISTS ABRASIVE JETS FOR CUTTING WATERJET

The theoretical studies of active-phase boundary of a supersonic jet. To increase the waterjet cutting ability of the jet, invited her to twist in the mixing tube by cutting spiral grooves. Amendments proposed to the laws of propagation of a liquid jet of circular cross section, taking into account its twist. The dependence of the expansion of the diameter of the jet, depending on the distance from the contact surface of the jet with the material flow of abrasive particles and the diameter of the nozzle.

Waterjet cutting, twisting of the jet, two-phase flow

Для изготовления плоских деталей из листа широкое применение находят механические методы обработки. Однако при резании по сложному контуру возникают недостатки, связанные с низкой производительностью, сложностью и высокой стоимостью отрезного инструмента (штамповая оснастка), трудностью или невозможностью раскроя.

За последние годы в мировой практике накоплен значительный опыт резания материалов по сложному контуру с использованием энергии ультразвука, плазмы, лазера, гидроабразивной струи. При массовой вырезке однотипных деталей из листов, например, фланцев, книц, листов фундаментов, полос и т.д. применяют гидроабразивную резку. В этом случае стоимость резания одного погонного метра металла гидроабразивной струей не превышает стоимость при лазерной резке, а, так как поверхность заготовки не подвергается короблению, прижогам и термическому упрочнению, этот метод получает существенное превосходство.

Таким образом, целесообразность применения гидроабразивной резки определяется следующими преимуществами:

- а) возможностью вырезки тонколистовых деталей по любому контуру без оплавления кромок и коробления листов;
- б) высокой производительностью;
- в) идентичностью и точностью форм деталей.

На получение хороших результатов существенное влияние оказывает правильный выбор места начала резки. При вырезке внутренних контуров резку начинают с отверстий, заранее просверленных на некотором расстоянии от контура деталей. При наличии зазоров гидроабразивная струя искривляется и растекается в стороны, образуя завихрения, которые препятствуют сквозному прорезанию материала, при этом процесс резания прекращается. Для получения устойчивого процесса резки при резании по сложному контуру скорость гидроабразивной струи снижается.

В [2] рассматривается движение абразивных частиц в струе жидкости (скорость частиц близка к местной скорости жидкости) и предлагаются поправки в законы распространения жидкостной струи круглого сечения учитывающих наличие распределенных на её сечение твердых частиц или капелек жидкости.

Для увеличения режущей способности гидроабразивной струи предложено закручивать её в смесительной трубке путем нарезания спиралеобразной канавки с шагом h . Рассмотрим, как изменяются предлагаемые поправки в этом случае.

Помимо поступательного движения, струя имеет и вращательное движение за счет закрутки её спиралеобразной канавкой на стенках сопла.

Будем считать, что на выходе из сопла процесс закрутки полностью сформировался.

Обозначим через ω – интенсивность закрутки струи, h – шаг спирали канавки на стенках сопла; R – внутренний радиус сопла, r – текущий внутренний радиус ($0 < r < R$).

Основными факторами, влияющими на интенсивность закрутки струи, будут: u_m – скорость потока на оси; h – шаг спиралеобразных канавок; R – внутренний радиус сопла. Интенсивность закручивания струи можно рассматривать, как функцию от этих факторов:

$$w = f(u, R, h).$$

Согласно теории размерностей и подобия, одна из безразмерных комбинаций указанных факторов

$$w = \frac{ku_m}{h} \left(\frac{r}{R} \right)^a, \quad (1)$$

где k – безразмерный поправочный коэффициент, a – величина, определяющая профиль завихренности поперек потока; k и a определяются опытным путем.

Для определения зависимости радиуса двухфазной струи от расстояния до поверхности контакта струи с материалом воспользуемся методикой, изложенной в [2].

Гипотетически в двухфазном высокоскоростном потоке скорость частиц абразива близка к местной скорости частиц жидкости, т.е. движение двухфазного потока может быть приближено к законам движения обычной жидкости. Внесем поправки, учитывающие наличие абразивных частиц в потоке жидкости. Для этого воспользуемся интегральным условием сохранения количества движения двухфазного потока.

Если струйное движение поступательно, то условие запишется в виде

$$\int_0^F r_{жс} u^2 (1 + c) dF = I_0, \quad (2)$$

где $I_0 = \frac{G_{жс}}{g} u_{жс} + \frac{G_n}{g} u_n$ – начальный импульс струи; c, u – местная весовая концентрация частиц и скорость в произвольной точке струи; $G_{жс}, G_n$ – начальные весовые секундные расходы жидкости и частиц; $r_{жс}$ и r_n – плотность жидкости и частиц; dF – элемент площади сечения струи.

Для учета момента количества движения закрученной струи в левую часть уравнения (2) введем дополнительное слагаемое:

$$\int_0^F (wr)^2 (1 + c) dF,$$

Тогда уравнение (2) примет вид

$$\int_0^F r_{жс} [u^2 + (wr)^2] (1 + c) dF = I_0, \quad (3)$$

Для струи круглого сечения

$$F = \pi r^2, \quad dF = 2\pi r dr = 2\pi r^2 dx,$$

где $x = \frac{r}{R}$ – безразмерная координата.

Если $r_{жс} = const$, то уравнение (3) запишется в виде

$$2r_{жс} u_m^2 F \int_0^1 \left[\left(\frac{u}{u_m} \right)^2 + \left(\frac{wr}{u_m} \right)^2 \right] (1 + c) x dx = I_0, \quad (4)$$

Здесь u_m – скорость на оси струи.

Интеграл в левой части уравнения (3) вычисляется в [1]. Вычислим интеграл:

$$\int_0^1 \frac{wr}{u_m} x dx, \text{ учитывая, что } w = \frac{ku_m}{h} \left(\frac{r}{R} \right)^\alpha, \text{ выберем линейную зависимость, т.е. пусть } \alpha = 1.$$

Тогда получим

$$\int_0^1 \left(\frac{wr}{u_m} \right)^2 (1 + c) x dx = \int_0^1 \frac{k^2}{h^2} \left(\frac{u}{u_m} \cdot x \right)^2 (1 + c) x dx = \frac{k^2}{h^2} \left[\int_0^1 \left(\frac{u}{u_m} \right)^2 x^3 dx + c_m \int_0^1 \left(\frac{u}{u_m} \right)^2 \frac{c}{c_m} x^2 dx \right], \quad (5)$$

c_m – концентрация частиц абразива на оси струи. Предполагая, что профиль скорости и концентрация частиц в поперечном сечении струи выражаются идентичными зависимостями, как и в однофазных струях [1], можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \frac{u}{u_m} &= (1 - x^{1.5})^2 \\ \frac{c}{c_m} &= 1 - x^{1.5} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

Вычислим интегралы в формуле (5):

$$\left. \begin{aligned} D_2 &= 2 \int_0^1 \left(\frac{u}{u_m} \right)^2 x^3 dx \\ E_2 &= 2 \int_0^1 \left(\frac{u}{u_m} \right)^2 \frac{c}{c_m} x^3 dx \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

A_2 и C_2 согласно [2] имеют вид

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= 2 \int_0^1 \left(\frac{u}{u_m} \right)^2 x dx \\ C_2 &= 2 c_m \int_0^1 \left(\frac{u}{u_m} \right) c_m x dx \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Подставим значение (7) в уравнение (5) и затем в (3):

$$u_m^2 r_{ж} F \left(A_2 + c_m C_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + c_m \frac{k^2}{h^2} E_2 \right) = I_0$$

или

$$\left(\frac{u_m}{u_0} \right)^2 r_{ж} u_0^2 F \left[A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + c_m \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right) \right] = I_0,$$

Отсюда приходим к формуле для скорости на оси двухфазной струи круглого сечения:

$$u_m = u_0 \left(\frac{I_0}{r_{ж} u_0^2 F} \frac{1}{A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + c_m \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

где u_0 – начальная скорость струи; F – начальная площадь сечения струи.

Делая некоторые математические преобразования с учетом [2], можно показать, что радиус двухфазной струи выражается зависимостью

$$r_{cmp} = 0,22(x - r_c) \frac{B_2 + 0,5 \left[\left(A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 \right) - \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right) \right] s}{B_2 + (A_2 - C_2)s}. \quad (10)$$

где $s = \frac{G_n u_0}{I_0 g}$ – постоянная; x – расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности; r_c – радиус сопла.

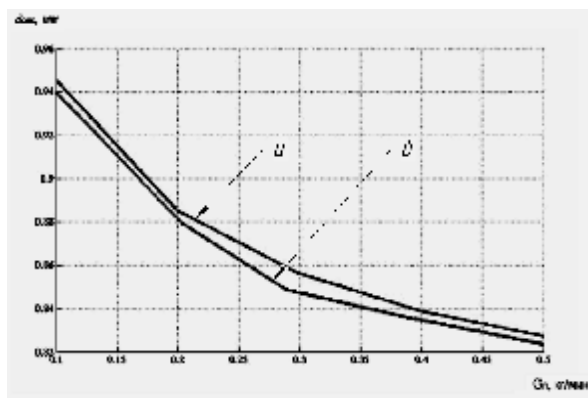
B_2 из условия сохранения массы имеет вид [2]:

$$B_2 = 2 \int_0^1 \frac{c}{c_m} \frac{u}{u_m} x dx,$$

Анализируя полученные теоретические зависимости из формулы (9) можем увидеть, что при увеличении начальной скорости струи, её импульса и шага канавки увеличится и скорость на выходе из сопла, а при увеличении плотности жидкости и диаметра струи скорость соответственно снизится. Из формулы (10) видим, что на увеличение диаметра струи будет влиять увеличение значений начальной скорости, расхода частиц, расстояния до обра-

батываемой поверхности, радиуса сопла и расхода частиц, в то же время с увеличением шага канавки диаметр струи уменьшится. Этот эффект достигается за счет того, что гидроабразивная струя, дополнительно проходя по спиралеобразной канавке, закручивается, и за счет работы центробежных сил происходит концентрация абразива на её оси. Кроме того, закручивание струи придает ей сверлильный эффект, что приводит к повышению режущей способности гидроабразивной струи.

На рисунке представлен график зависимости расширения диаметра струи от расхода частиц без закручивания струи *а* и с закручиванием струи *б*. Расчет проведен при условиях: расстояния до поверхности обрабатываемого материала 3 мм, сопло диаметром 0,4 мм, абразив гранат плотностью 3500 кг/м³, расход воды через поперечный срез сопла 4 л/мин.



Зависимость расширения диаметра струи от расхода частиц:
а – без закручивания струи; б – с закручиванием струи

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. М.: Физматгиз, 1960. 230 с.
2. Михеев А.В. Моделирование активной границы сверхзвуковой двухфазной струи в межслойной зоне при пакетном резании материалов / А.В. Михеев, Е.Г. Алюшин // Известия ОрелГТУ. № 2-4. 2009. С. 8-13

Шпилев Василий Владимирович – аспирант кафедры «Технологии машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Shpilev Vasily Vladimirovich – post-graduate faculty «Technology of mechanical engineering» Saratov State Technical University

Решетников Михаил Константинович – доктор технических наук, профессор, кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Reshetnikov Mihail Konstantinovich – doctor of technical sciences, professor of chair «Manufacturing Engineering», Saratov State Technical University

Береда Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика, гидравлические машины и водоснабжение», Саратовского государственного технического университета

Bereda Nikolai Nikolaevich – candidate of technical sciences, docent of chair Hydraulics, «Hydraulic machines and water supply», Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.791.5

Н.М. Котина, О.Ю. Жевалёв, Л.Е. Куц, Е.А. Донец

СОЗДАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИ ПРОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ФЕРРИТОВ

Одна из основных проблем технологии диффузионной сварки ферритов с металлами – возможность изменения структуры и основных электромагнитных параметров ферритов. Большое многообразие физических и химических свойств ферритовых материалов требует оценки влияния вакуумно-термического воздействия на параметры фактически каждого типа ферритов. Глубина этого влияния определяет дальнейшую технологию изготовления ферритометаллических узлов.

Феррит, металл, неразъемное соединение, феррито-металлический узел, диффузионная сварка, механические свойства

N.M. Kotina, O.Yu. Zhevaley, L.E. Kuts, E.A. Donets

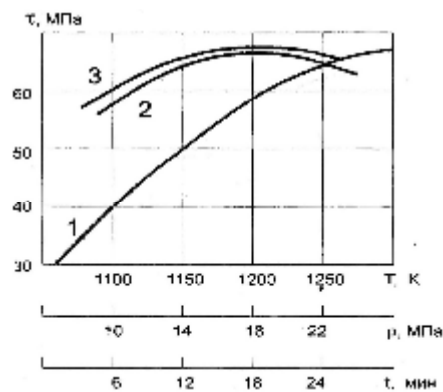
PRODUCTION OF MECHANICALLY STRONG JOINTS OF METALS WITH DIFFERENT TYPES OF FERRITES

One of the general problems of diffusion ferrite-metal welding technology is a probability of changing the structure and the main electromagnetic parameters of ferrite. A large variety of physical and chemical properties of ferrite materials requires an assessment of the influence of vacuum thermal effects on the parameters of every type of ferrites. The depth of this influence determines the further manufacturing technology of ferrite-metal nodes.

Ferrite, metal, one-piece, join, ferrite-metal, node, diffusion, welding, mechanical characteristics

Важнейшими качественными показателями керамики, определяющими возможность ее сварки и применения, являются прочность и термостойкость. В процессе сварки и эксплуатации керамических изделий неизбежны колебания температуры, вследствие чего возникают температурные напряжения. Температурным изменениям, приводящим к разрушению изделий, соответствует критическая разность температур, определяемая произведением двух величин: сопротивления термическому напряжению и фактора формы тела. Сравнение физико-механических свойств показывает, что термостойкость ферритов в 5-14 раз ниже, чем алюмооксидной керамики, а самые низкие значения имеют феррошпинели. Поэтому обычно используемые при сварке электроизоляционных керамик скорости нагрева и охлаждения (0,25 – 0,3 К/с) при сварке ферритов пригодны только для небольших узлов. Для узлов больших размеров они должны быть понижены до 0,08 – 0,12 К/с. Таким образом, скорости нагрева и охлаждения – важные параметры сварки металлов с керамическими материалами.

Одна из основных проблем технологии диффузионной сварки ферритов с металлами – возможность изменения структуры и основных электромагнитных параметров ферритов. Большое многообразие физических и химических свойств ферритовых материалов требует оценки влияния вакуумно-термического воздействия на параметры фактически каждого типа ферритов, глубина этого влияния определяет дальнейшую технологию изготовления ферритометаллических узлов. Учитывая, что ферритовая структура может быть изменена под действием нагрева в вакууме и что причина такого изменения будет связана с потерей кислорода, измерение температурной зависимости удельного электросопротивления феррита было выбрано как основной способ оценки таких изменений. Исследования показали, что нагревание ферритов в вакууме влияет на их электросопротивление и некоторые другие характеристики. Уменьшение электросопротивления можно объяснять потерей кислорода ферритовым материалом и, как результат, появление дополнительного количества ионов Fe^{2+} . Это подтверждается результатами дополнительных химических исследований: исходный феррит содержал 0,11 – 0,17 % Fe^{2+} , после нагревания при 1173 К – 1,47 – 1,59 % Fe^{2+} . Наблюдается увеличение доли катионов Fe^{2+} и электропроводности феррита. Необходимо отметить, что повторное нагревание на воздухе фактически восстанавливает электропроводность, что объясняется возвратом кислорода в структуру феррита. Все эти выводы справедливы для классических режимов ДС (рисунок).



Зависимости прочности соединений феррограната 3ОСЧ6 + медь МБ: (1 – от температуры; 2 – от сварочного давления; 3 – от времени изотермической выдержки)

В этом случае для получения соединений, имеющих максимально возможную прочность, температура сварки должна обеспечивать наилучшие условия образования активных центров атом-вакансионного типа (таблица).

Температура сварки и прочностные характеристики материалов

Материал	Температура сварки		Прочность соединения, МПа
	абсолютная, К	гомологическая, $T_{св}/T_{пл}$	
Pb - Al ₂ O ₃	563	0,94	56
Al - Al ₂ O ₃	893	0,96	95
Cu - Al ₂ O ₃	1298	0,96	153
Cu - Y _{2,22} Cd _{0,75} O ₁₂ (феррогранат)	1298	0,96	65
Cu - ультрафарфор	1303	0,96	120
УФ46	1313	0,97	180
Cu - ВК94-2	1623	0,94	200
Ni - Al ₂ O ₃	1647	0,89	220
Fe - Al ₂ O ₃	893	0,96	180
АМц-ВК94-1, АМц-ВК100-2	893	0,96	70

ЛИТЕРАТУРА

1. Конюшков Г.В. Ферриты и их соединения с металлами и керамикой / Г.В. Конюшков, Б.М. Зотов, Э.И. Меркин. М.: Энергия, 1979. 232 с.
2. Стабильность свойств ферритов / Р.М. Биктяков, Д.В. Гаскаров, Ю.С. Зворонко и др. М.: Сов. радио, 1974. 351 с.
3. Конюшков Г.В. Физические и химические основы формирования сварных соединений металлов с неметаллическими материалами / Г.В. Конюшков // Сварка и Диагностика. 2007. №1. С. 6-8.

Котина Наталия Макаровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронное машиностроение и сварка» Саратовского государственного технического университета

Kotina Natalia Makarovna – Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of chair « Electronic mechanical engineering and welding » the Saratov State Technical University

Жевалев Олег Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронное машиностроение и сварка» Саратовского государственного технического университета

Zhavalev Oleg Yurievich – Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of chair « Electronic mechanical engineering and welding » the Saratov State Technical University

Куц Любовь Евгеньевна – ассистент кафедры «Электронное машиностроение и сварка» Саратовского государственного технического университета

Kuts Lubov Eugeniivna – Assistant of Department «Electronic mechanical engineering and welding» Saratov State Technical University

Донец Елена Анатольевна – студент кафедры «Электронное машиностроение и сварка» Саратовского государственного технического университета

Donets Elena Anatolievna – Student of Department «Electronic mechanical engineering and welding» Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 23.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 681.323

С.К. Сперанский, К.С. Сперанский

**АНАЛИЗ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ**

Для исследования состояния плазменного покрытия применен детектор на основе метода главных компонент (Principal Component Analysis). Для улучшения работы алгоритма совместно с полутонным изображением анализируется его градиентный вариант.

Распознавание объектов; метод главных компонент; реконструкция; плазменное покрытие

PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS OF PLASMA-SPRAYED COATINGS

In this paper, we present an object detection system and its application to plasma-sprayed coating with the classifier based on the Principal Component Analysis (PCA). In order to improve the performance of the classifier we have used the gradient image as additional information for it.

Object detection; Principal Component Analysis; reconstruction; plasma coating

1. Введение

В настоящее время в имплантологии применяются множество материалов с необходимыми биологическими и биомеханическими свойствами. Испытания как в России, так и за рубежом в течение многих лет показали эффективность и перспективность применения имплантатов с биологически активными пористо-порошковыми покрытиями. На титановую основу имплантата с помощью технологии плазменного напыления наносится переходной слой из порошка титана, а затем слой биологически активной керамики, состоящей из гидроксиапатита ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$).

Процесс плазменного напыления заключается в создании плазменной струи, вводе в нее наносимого материала, расплавлении и разгоне частиц, их движении в газовом потоке и осаждении на поверхность заготовки. Наличие в газодисперсном потоке частиц, находящихся к моменту соударения с основой в различных агрегатных состояниях, является важным фактором, определяющим характер и степень структурной и механической неоднородности материала, получаемого методами плазменного напыления.

Существенные изменения происходят в ряде случаев с химическим составом материала вследствие взаимодействия напыляемых частиц с газами окружающей атмосферы и плазмой. При протекании химических реакций на поверхности могут образовываться газообразные продукты реакции, отводимые в поток и влияющие на другие частицы. За время пребывания частицы в плазме может происходить несколько циклов обновления материала на обрабатываемой поверхности [1].

С целью изучения морфологии плазменного покрытия из гидроксиапатита и его химического состава после напыления были проведены исследования напыленных образцов [2]. В данной работе мы концентрировали свое внимание на изучении микровыступов шарообразной формы (рис. 1), образующихся на напыляемой поверхности, так как их размер и количество зависят от режимов напыления и влияет на эксплуатационные характеристики покрытия: адгезию, когезию, биосовместимость.

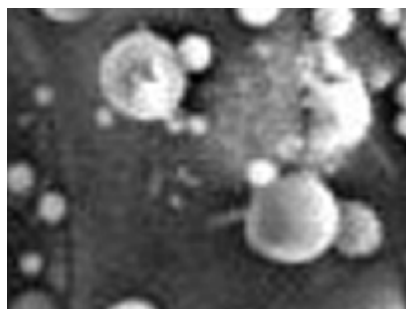


Рис. 1. Фотография напыленной поверхности с микрочастицами

Практический интерес представляет разработка алгоритма и программы автоматического распознавания микрочастиц на цифровом изображении. При наличии данных инструментов можно говорить о возможности создания системы автоматической оценки характеристик напыленных материалов по цифровым фотографиям их поверхностей.

2. Методика детектирования микрочастиц

Задача детектирования шарообразных микрочастиц на полутоновом изображении поверхности, аналогичном рис. 1, можно сформулировать как задачу классификации каждого из участков снимка как содержащего или не содержащего микрочастицу. Микрочастицы имеют разную величину, поэтому участки детектирования будут различаться по размеру. С другой стороны, все микрочастицы имеют схожую шарообразную форму, что позволяет не строить различные классификаторы, а проводить детектирование с помощью одного классификатора и масштабирования исходного изображения.

Существует множество методов классификации изображений [3]. В предлагаемой работе для классификации изображений был применен метод главных компонент [4, 5, 7]. Этот метод является одним из наиболее подходящих в условиях неравномерной освещенности и при наличии частично пересекающихся объектов.

3. Подготовка обучающей информации

Как было сказано в пункте 2, задача детектирования микрочастиц на полутоновом изображении может быть сведена к определению, является ли отдельный участок изображения микрочастицей или нет. Поэтому необходимо подготовить обучающие примеры, которые будут содержать как микрочастицы (позитивное детектирование), так и участки напыленной поверхности, не содержащие микрочастицы (негативное детектирование).

Для правильной работы алгоритма все обучающие примеры (рис.2) должны быть приведены к одному и тому же размеру. Мы остановились на размере 100×100 пикселей, т.к. это был средний размер изображений микрочастиц, получаемых с электронного микроскопа.

Кроме того, использовали не только полутоновые изображения, но и их градиентные версии, полученные с помощью свертки изображения с оператором Собеля (1) и (2), выделяющего переходы между полутонами. В ситуации, когда контуры микрочастиц похожи друг на друга, градиентные версии изображений предоставляют дополнительную информацию, обеспечивающую более надежное детектирование.

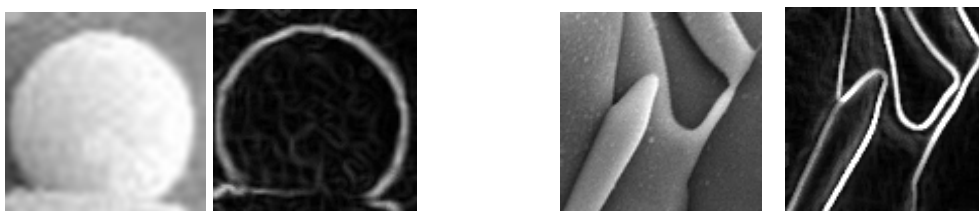


Рис. 2. Позитивные (слева) и негативные (справа) обучающие примеры вместе с соответствующими градиентными представлениями

$$G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * I \quad G_x = \begin{bmatrix} +1 & 0 & -1 \\ +2 & 0 & -2 \\ +1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * I \quad , \quad (1)$$

где I – исходное изображение,

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad , \quad (2)$$

где G – искомое градиентное изображение.

4. Метод главных компонент

Метод главных компонент является способом уменьшения размерности данных при минимальной потере информации. При использовании метода главных компонент будем искать пространства меньшей размерности, в ортогональной проекции на которые разброс данных будет максимизирован. Формируем представление изображения $I(x, y)$ в виде линейной модели с базовыми функциями Ψ_i и коэффициентами a_i :

$$I(x, y) = \sum_i a_i \Psi_i(x, y). \quad (3)$$

Метод главных компонент создает линейную модель, которая отражает максимум вариаций данных. С одной стороны, мы можем искать вектор v , который минимизирует среднеквадратичную ошибку между исходными данными d и проекцией этих данных на v :

$$E_v = \sum_i (d_i - v^T d_i v)^2. \quad (4)$$

С другой стороны, можем попытаться найти вектор v , который максимизирует дисперсию проекции данных на вектор v (5). В обоих случаях результаты будут аналогичными.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i^T v)^2 = \frac{1}{N-1} v^T D D^T v, \quad (5)$$

где D – матрица, столбцы которой представляют собой векторы данных d_i .

В соответствии с (5) вектор v может быть найден как решение оптимизационной проблемы (6). Множитель Лагранжа λ был введен в целевую функцию для того, чтобы вектор решения v был единичным:

$$v = \operatorname{argmax}_v (v^T D D^T v + \lambda(1 - v^T v)) = \operatorname{argmax}_v (v^T [D D^T - \lambda I] v - \lambda) \quad (6)$$

Найдем оптимальное значение v , взяв производную от (6) и приравняв ее нулю:

$$\frac{d}{dv} (v^T [D D^T - \lambda I] v - \lambda) = 0 \quad (7)$$

После несложных преобразований из выражения (7) получаем выражение (8), которое можно определить как задачу нахождения собственных векторов v и собственных значений λ матрицы $C = D D^T$:

$$[D D^T] v = \lambda v \quad (8)$$

Фактически весь метод главных компонент заключается в вычислении собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы C , построенной с использованием исходных данных. В нашем случае исходными данными являются полутоновые и градиентные изображения размерностью 100×100 пикселей. Столбцы матрицы D представляют собой набор яркостей пикселей изображения 10000×1 , а общее количество столбцов равно количеству обучающих примеров.

Корреляционная матрица $C = D D^T$ имеет в этом случае весьма высокую размерность 10000×10000 и поиск ее собственных векторов и собственных значений представляет сложность с вычислительной точки зрения. Сирович и Кирби [6] доказали, что собственные векторы и собственные значения матрицы $C = D D^T$ равны собственным векторам и собственным значениям матрицы $C' = D^T D$. Последнее наблюдение позволяет в итоге оперировать квадратной матрицей, размерность которой равна количеству обучающих примеров.

Для вычисления главных компонент по каждому из наборов обучающих изображений составим матрицы яркости пикселей D размерностью $[a \times b]$, где a – количество пикселей на обучающем изображении (при использовании изображения 100×100 , $a = 10000$), b – количество обучающих изображений для каждого из четырех наборов (в нашем случае по 100 изображений): микрочастицы, немикрочастицы и их градиентные варианты. Затем вычисляется ковариационная матрица, причем необходимо учитывать, что среднее значение изобра-

жения вычитается из каждого обучающего изображения, и находятся собственные векторы v и собственные значения ковариационной матрицы λ . Количество собственных значений меньше или равно размерности b .

После того, как собственные векторы и собственные значения рассчитаны, можем вычислить так называемые собственные изображения A – компоненты, по которым фактически будут раскладываться наши изображения при детектировании:

$$A = \frac{Dv}{\sqrt{\lambda}} \quad (9)$$

5. Реализация детектора

После того, как собственные изображения вычислены, можем спроектировать исходный участок снимка на ограниченное количество собственных изображений, а затем восстановить исходное изображение из проекций. Восстановленное изображения будет тем ближе к оригиналу, чем более подходящий набор собственных изображений был выбран при проектировании, т.к. меньше информации будет потеряно во время трансформаций.

При обучении детектора было получено четыре набора собственных изображений:

- микрочастицы;
- градиентные варианты микрочастиц;
- фон;
- градиентные варианты фона.

Следовательно, если спроектировать/восстановить изображение микрочастицы (рис. 3, слева) с помощью ограниченного набора собственных изображений для микрочастиц (рис. 3, центр), то результат будет лучше, чем если спроектировать/восстановить то же изображение с помощью ограниченного набора собственных изображений для фона (рис. 3, справа).

Формализуя вышеприведенные принципы, производим проектирование изображения I на собственные изображения A , с учетом среднего изображения μ для этого набора собственных изображений:

$$P = A(I - \mu), \quad (10)$$

где P – проекция изображения I на собственные изображения A , A – матрица, столбцы которой состоят из собственных векторов матрицы ковариации C .

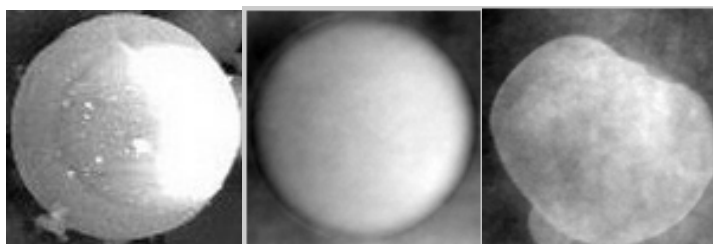


Рис. 3. Результат восстановления исходного изображения

Для восстановления исходного изображения будем применять следующее выражение:

$$I_r = A^T P + \mu, \quad (11)$$

где I_r – реконструированное изображение.

Для каждого изображения составим четыре метрики, показывающие различия между оригинальным изображением и реконструкцией с помощью собственных изображений для микрочастиц (d_1) и для фона (d_2), между соответствующим градиентным изображением и его реконструкцией с помощью собственных градиентных изображений для микрочастиц

(d_3) и собственных градиентных изображений для фона (d_4). Используем классификатор в следующей форме:

$$D = \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_4}{d_3} \tag{12}$$

Если D больше порогового значения $D > D_c$, то предполагаем, что исследуемое изображение является микрочастицей, в противном случае оно является фоном. Возникает вопрос, что принять за расстояние между двумя изображениями. В данной работе сравниваем две альтернативы: простой разности яркостей соответствующих пикселей двух изображений (13) и с помощью взаимной информации между двумя изображениями (14).

$$d = |I - I_r| \tag{13}$$

$$d(I, I_r) = \sum_{x \in I} \sum_{y \in I_r} p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \tag{14}$$

где $p(x, y)$ – совмещенная гистограмма распределения яркостей пикселей, $p_1(x), p_2(y)$ – гистограммы распределения яркостей пикселей.

На рис. 4 представлена сравнительная операционная характеристика детектора, показывающая зависимость между долей ложных срабатываний детектора (горизонтальная ось) и долей корректных срабатываний детектора (вертикальная ось). Фактически этот компромисс между долей ложных и корректных срабатываний выбирается подстройкой параметра D_c (12). Для обучения детектора были использованы 100 позитивных и 100 негативных примеров, а для его тестирования были использованы 200 позитивных и 500 негативных примеров участков изображения. В детекторе было применено 10 первых собственных изображений как для позитивных, так и для негативных примеров.

Как следует из рисунка, простая разница яркостей пикселей (13) ведет себя лучше для малого процента ложных срабатываний. Экспериментально установлено, что метрика на основе взаимной информации показывает худшие результаты для малого количества собственных значений и, кроме того, выражение (13) может быть рассчитано в 2 раза быстрее, чем выражение (14), что сокращает время обработки.

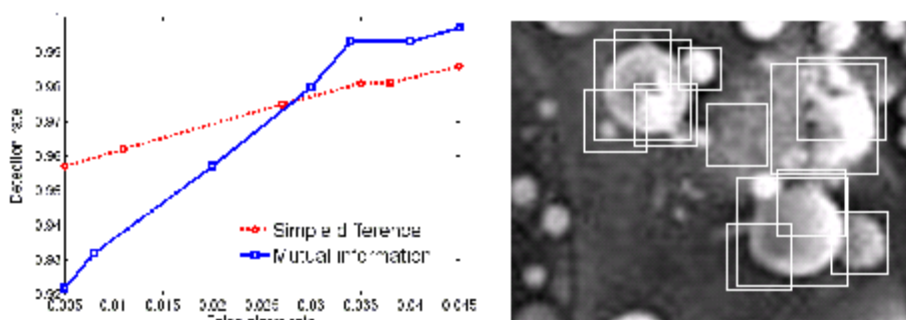


Рис. 4. Сравнительная операционная характеристика детектора с использованием разных метрик для оценки расстояния между изображениями (слева) и пример работы детектора (справа)

6. Особенности практической реализации

Для нахождения всех частиц на снимке, полученном с помощью электронного микроскопа, нам необходимо пройти сканирующим окном по всему изображению и для каждого фрагмента определить, есть ли в нем микрочастица или нет.

После применения детектора к снимку мы имеем множество позитивных детектирований (квадратных рамок), большинство из которых сконцентрировано вокруг микрочастиц (рис. 4). Поэтому в работе мы применили следующий метод для удаления лишних детекти-

рований. Предположим, после работы алгоритма существуют 2 пересекающихся детектирования (рис. 5, слева) и вероятность того, что микрочастица действительно находится там, где зафиксировано второе детектирование (box_2) выше, чем вероятность ее нахождения там, где зафиксировано первое детектирование (box_1). Эта вероятность пропорциональна параметру D в (12). Т.к. мы интересуемся только относительными величинами, то нет необходимости производить регрессионный анализ над D для поиска истинных значений вероятностей.

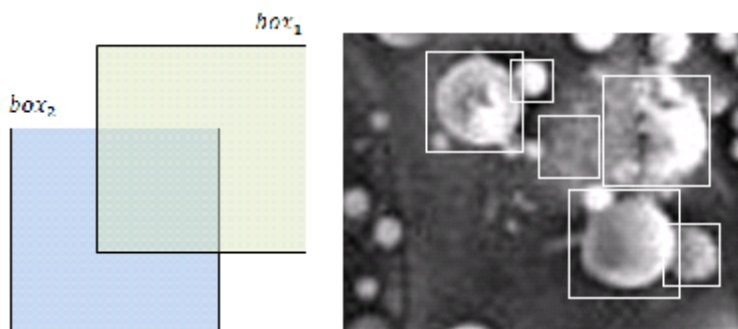


Рис. 5. Пересекающиеся окна (слева), снимок после применения алгоритма удаления лишних детектирований (справа)

Мы сохраняем box_1 если отношение площади конъюнкции (A_c) box_1 и box_2 к площади дизъюнкции (A_d) box_1 и box_2 меньше чем параметр R_{max} (15). В противном случае мы полагаем, что box_1 и box_2 относятся к детектированию одной и той же микрочастицы, и мы отбрасываем box_1 . Параметр $R_{max} = 0.4$ был выбран как компромисс между возможностью детектирования близко расположенных микрочастиц и загруженностью ложными детектированиями.

$$\begin{aligned}
 & p(particle|box_1) < p(particle|box_2) \\
 & \frac{A_c}{A_d} > R_{max} \rightarrow \text{удалить } box_1 \\
 & \frac{A_c}{A_d} < R_{max} \rightarrow \text{сохранить } box_1
 \end{aligned} \tag{15}$$

Как было сказано в п. 4, мы выбрали исходный размер изображений, на которых производится тренировка детектора, [100×100] пикселей. Все микрочастицы имеют разный размер, поэтому детектирование окном [100×100] пикселей производится по предварительно масштабируемому снимку. Чем больше шагов масштабирования, тем более точный результат детектирование и тем больше время работы алгоритма. Дополнительной особенностью является то, что порог срабатывания детектора D_c необходимо увеличивать при уменьшении размеров окна для минимизации количества ложных срабатываний.

По окончании работы программы, написанной в среде Matlab, мы имеем распределение микрочастиц по размерам. Используя эту информацию, возможно формирование экспертной системы, которая будет способна автоматически анализировать снимки поверхности и формировать отчет о характеристиках полученного материала. В дальнейшем эта информация может быть интегрирована в экспертную систему, управляющую режимами обработки материалов концентрированными потоками энергии.

7. Заключение

В статье приведен современный подход, автоматизирующий анализ состояния напыленной поверхности. На основании метода главных компонент была разработана программа в среде Matlab для детектирования микрочастиц на полутоновых изображениях, полученных с помощью электронного микроскопа. Использование подхода, реализованного в данной работе, позволит определить оптимальные режимы напыления для получения поверхности с заданными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко и др. М.: Наука, 1990. 408 с.
2. Фомин А.А. Биосовместимые наноструктурированные гидроксипатитовые покрытия и технология их получения плазменно-индукционным напылением / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, В.Н. Лясников // Упрочняющие технологии и покрытия. №6 (78). 2011. С. 35-42.
3. Новейшие методы обработки изображений / А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, А.А. Пахомов, В.А. Герман; под ред. А.А. Потапова. М.: ФЛИТ, 2008. 496 с.
4. Malagon-Borja L. Object detection using image reconstruction with PCA / L. Malagon-Borja, O. Fuentes, IVC, 27: 2–9, 2009
5. Jolliffe I.T. *Principal Component Analysis*, Series: *Springer Series in Statistics*, 2nd ed., Springer / I.T. Jolliffe. NY, 2002, XXIX, 487 p. 28
6. Sirovich L. Low-dimensional procedure for the characterization of human faces / L. Sirovich, M. Kirby. *J Opt Soc Am A* 4:(3) 519-524 Mar 1987
7. Turk, M. and Pentland, A. (1991). Eigenfaces for recognition / M. Turk, A. Pentland. *The Journal of Cognitive Neuroscience*, 3(1): 71-86.

Сперанский Сергей Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физическое материаловедение и технология новых материалов» Саратовского государственного технического университета
Сперанский Константин Сергеевич – менеджер акционерного предприятия «АЛСиТЕК», г. Саратов

Speransky Sergey Konstantinovich – Candidate of Technical Science, senior lecturer chair «Physical substance and technology new materials» the Saratov State Technical University
Speransky Konstantin Sergeevich – manager corporate enterprise «ALS&TEC», Saratov

Статья поступила в редакцию 16.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 681.5

С.К. Сперанский, К.С. Сперанский

НАНЕСЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Процесс плазменного напыления отличается низкой стабильностью и большим количеством параметров, влияющих на этот технологически процесс. С целью получения необходимой толщины и качества покрытия предложено устройство управления с использованием нечеткого регулятора.

Плазменное напыление, нечеткая логика, фотоприемник, шаговый двигатель

S.K. Speransky, K.S. Speransky

PLASMA SPRAYING COATING, USING FUZZY LOGIC

Plasma spraying coating is characterized of poor stability and a large choice of parameters have to be planned. Fuzzy controller in technical system is used to predict thickness and quality of coating.

Plasma spraying, fuzzy logic, photodetector, stepping motor

Процесс плазменного напыления отличается низкой стабильностью. Разброс свойств покрытий на отечественном оборудовании может достигать 200%. Качество покрытия характеризуется многими свойствами: прочностью сцепления покрытия с основой, когезионной прочностью напыленного слоя, минимальной или регулируемой пористостью, равномерной толщиной покрытия, а также регулируемым уровнем остаточных напряжений. На эти свойства влияет более 60 различных факторов. Управление качеством покрытий включает выбор технологических параметров процесса, влияющих на показатели качества покрытий, и регулирование ими (стабилизация или изменение по заданной программе).

Управляющие воздействия можно разделить на режимные (величина тока дуги, напряжение, расход и состав плазмообразующего газа, расход порошка и транспортирующего газа) и кинематические (дистанция, угол напыления, скорость перемещения и подача плазматрона, скорость вращения заготовки) [1].

Наиболее важные задачи при управлении этим технологическим процессом является обеспечение необходимой толщины и пористости покрытия.

Плазменная установка является объектом, где сложность и многообразие протекающих физико-химических превращений сочетаются со слабой информативностью процесса и в некоторых случаях значительную роль играют, скорее, не количественные показатели, а качественные оценки. Хотя покрытия и наносятся по регламенту, решения по коррекции технологических параметров принимаются оператором на основе личного опыта и носят, по сути, интуитивный характер. Как следствие этого, процесс управления плохо поддается автоматизации в рамках четкой математической логики. Применение же аппарата нечеткой логики позволит моделировать механизм принятия решения и улучшить качество управления установкой.

В отличие от традиционной математики, требующей на каждом шаге моделирования точных и однозначных формулировок закономерностей, нечеткая логика предлагает совершенно иной уровень мышления: процесс моделирования происходит на наивысшем уровне абстракций, при котором постулируется лишь минимальный набор закономерностей [2]. Решающую роль в оптимизации показателей эффективности играют эксперты, которые формулируют правила, определяют количество входных и выходных переменных, число термов для каждой переменной, виды функции принадлежности, так как изменение этих параметров приводит к улучшению или ухудшению процесса управления установкой.

Установка (рис. 1), обеспечивающая стабилизацию режимов напыления, должна включать нечеткий регулятор, в который вводят заданную толщину и пористость покрытия. В процессе напыления производится опрос датчиков толщины и пористости.

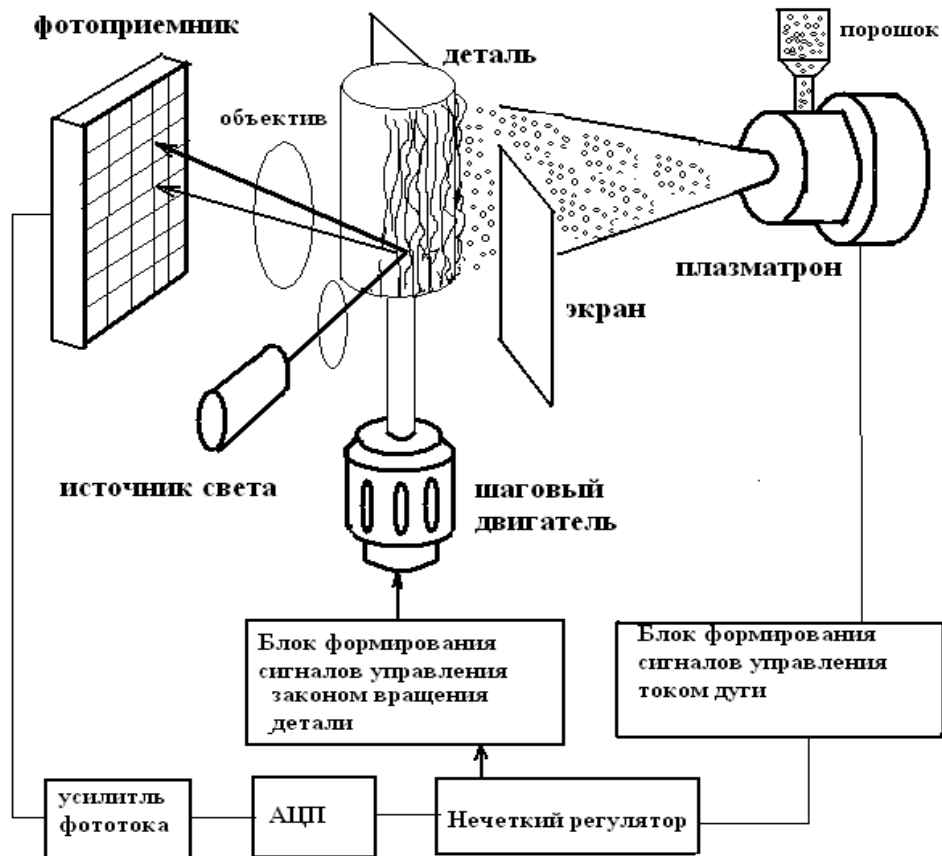


Рис. 1. Схема процесса плазменного напыления

В случае отклонения указанных параметров на регулятор тока подается сигнал, увеличивающий (уменьшающий) ток дуги, а также уменьшение или увеличение частоты импульсов, поступающих на двигатель вращения напыляемой детали. Для нанесения покрытий с переменными свойствами изделие разбивают на элементарные участки, на каждом из которых свойства принимаются постоянными. На границе участков по сигналу с устройства, фиксирующего положение плазматрона относительно изделия, режим напыления и перемещения изменяется. В пределах каждого участка работает алгоритм стабилизации.

Известно, что физические свойства материалов можно рассматривать как выражение количественной меры их структурной реакции на внешнее воздействие заданной природы. Используемая система контроля обладает расчетно-аналитическими возможностями, превращающими его в систему фотометрической диагностики состояния плазменных покрытий и в средство измерения локальных реальных физических характеристик поверхности покрытия. Физической основой системы является совместный анализ изображения поверхности покрытия и спектра яркости белого света, отраженного от поверхности напыляемой детали и принимаемых фотоприемником. При этом на анализируемом изображении выделены отдельные пиксели, дающие вклад в отражение в выделенном пользователем диапазоне интенсивностей. Первым шагом анализа является проверка степени структурной однородности исследуемого образца в исходном состоянии. При этом под структурной однородностью материала понимается степень однородности распределения на его исходной поверхности микронеровностей, задаваемых технологической наследственностью (в результате технологической обработки материала). Именно шероховатость и ее распределение по поверхности образца определяет локальные условия отражения от нее источника света.

Изображения поверхности всех фрагментов детали вводятся в регулятор и с них снимаются спектры отражения белого света. Каждый спектр отражения представляет собой раз-

ложение отраженного от поверхности образца белого света по степеням яркости (по интенсивности отражения). Обычно используется диапазон из 256 градаций. Каждый из диапазонов яркости несет в себе информацию о состоянии шероховатости поверхности, которая проявляется в характере ее отражающей способности. Если рельеф глубокий, то на этих участках отмечается повышенное поглощение падающего света (коэффициент экстинкции). При качественном напылении отражение от точек поверхности носит регулярный характер и имеет сравнительно однородное распределение. При отклонении в режимах напыления отражение от точек отличается нерегулярным характером и случайным распределением [3]. Задача состоит в том, чтобы проследить процесс формирования плазменных покрытий и воздействуя на входные параметры управлять им. Измерительная цепь позволяет осуществлять измерение как нагретых тел, так и холодных за счет подсветки контролируемого участка.

Для измерения толщины покрытия используется принцип оптической триангуляции. Источник света посылает через линзу луч, который отражается от объекта и фокусируется на матрице из фотодиодов (ПЗС), которая преобразует световые сигналы в электрические. Всякое изменение расстояния до поверхности вызывает изменение угла отражения луча и, следовательно, позицию, которую отраженный луч занимает на матрице. Сигналы изображений от матрицы через усилители и АЦП поступают в регулятор, который осуществляет обработку сигналов изображений. Таким образом, производится одновременный анализ пространственных и спектральных свойств объекта. В устройстве реализуется синхронное получение информации датчиком с поверхности, траектория которой совпадает с траекторией напыления. При завершении полного оборота в блоке памяти фиксируются данные о параметрах напыленной поверхности по всему контуру детали. На основе этой информации нечеткий регулятор формирует необходимые управляющие воздействия – скорости вращения шагового двигателя и тока дуги, которые реализуются в последующем цикле.

Как известно, рассматриваемый процесс сопровождается свечением плазменной струи над напыляемой поверхностью. В результате возникает значительная погрешность от оптической помехи, вызванной этим эффектом. Для устранения этого влияния используем разностный сигнал от поверхности A_i при отсутствии $Q_0(x,t)$ и наличия света от осветителя $Q(x,t)$.

$$z = b(t) \left[\int_{A_i} Q(x,t) dx - \int_{A_i} Q_0(x,t) dt \right], \quad (1)$$

где $b(t)$ – интегральная чувствительность датчика.

Основой устройства управления для плазменного напыления является нечеткий регулятор [4], который использует базы нечетких знаний и реализует композиционные правила логического вывода на основе входной информации, поступающей от фотоэлектрического датчика (рис. 2).

Теория нечетких множеств и приближенных рассуждений опирается на понятия лингвистической переменной, систему операций над нечеткими множествами и методы построения функции принадлежности.

Состояние покрытия описывается лингвистическими переменными «толщина» и «шероховатость», значения которых задаются с помощью средств естественного языка и используются для выражения необходимых качественных оценок. Лингвистическая переменная «толщина» может принимать значения из следующего набора характеристик (термов): «малая», «нормальная» и «большая». Соответственно лингвистическая переменная «шероховатость» – «низкая», «средняя», «высокая». Возможные управляющие решения по «скорости вращения» и «току дуги» ограничены в зависимости от конкретной ситуации тремя управляющими воздействиями: «Увеличить УВ», «Не изменять НИ», «Уменьшить УМ». В блоке фаззификации каждому значению лингвистической переменной ставится в соответствие некоторое нечеткое множество со своей функцией принадлежности. Функция принад-

лежности выражает субъективную возможность наличия определенных свойств. В блоке решений производятся логические операции над нечеткими множествами. В блоке дефаззификации производится процесс нахождения обычного (не нечеткого) значения выходных лингвистических переменных методом центра тяжести. Значение выходной переменной равно абсциссе центра тяжести площади, ограниченной графиком кривой функции принадлежности выходной переменной.

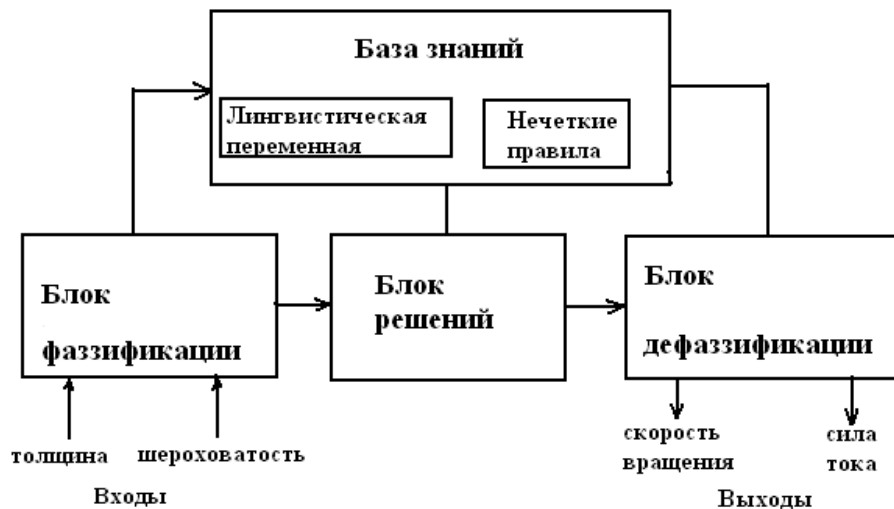


Рис. 2. Структурная схема нечеткого регулятора

Рассмотрим процедуру поиска управляющего решения на основе алгоритмов нечеткого вывода.

1. Для каждого управляющего решения – по скорости вращения и току дуги, определим матрицы $M_{УМ}$ (Уменьшить), $M_{НИ}$ (Не изменять), $M_{УВ}$ (Увеличить), описывающие силу воздействия соответствующих управляющих решений.

2. Идентифицируем текущее состояние напыленного покрытия S_0 .

3. Моделируем выбранное управляющее решение. Для этого выполняем композицию нечетких значений признаков напыленного покрытия S_0 и нечетких отношений, задающих силу воздействия выбранного управления. В результате получим состояние покрытия S_1 .

4. Находим величину требуемого управляющего воздействия. Сначала определяем нечеткое отношение, композиция которого с S_0 приводит к получению S_1 . Для этого вычисляем декартово произведение $S_0 \times S_1$ и строим матрицу нечетких управляющих решений M .

5. Раскладываем полученное управляющее решение в базисе («УМ», «НИ», «УВ») и находим управляющее воздействие в нечетком виде R .

6. Определяем количественное значение управляющего решения. Для этого строим объединение конъюнкций нечетких множеств, задающих термы «УМ», «НИ», «УВ», со степенями принадлежности этих термов нечеткому множеству R и находим центр площади полученной фигуры.

Заключение.

1. В статье предложена схема установки для плазменного напыления с использованием нечеткого контроллера.

2. Рассмотрена процедура поиска управляющего решения на основе алгоритмов нечеткого вывода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лясников В.Н. Плазменное напыление в электронике и биомедицинской технике: учеб. пособие для студ. физ.-техн. спец. / В. Н. Лясников, Н. В. Протасова; Саратов. гос. техн. ун-т. Саратов: СГТУ, 2010. 285 с.

2. Мелихов А.Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А.Н. Мелихов, Л.С. Бернштейн, С.Я. Коровин. М.: Наука, 1990. 272 с.

3. Определение оптических свойств и толщины нанослоев по угловым зависимостям коэффициента отражения / Д.И. Биленко, А.А. Сагайдачный, В.В. Галушка, В.П. Полянская // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 10. С. 89-94.

4. Abdoul-Fatah Kanta, Ghislain Montavon, Marie-Pierre Planche and Christian Coddet. Plasma Spray Process On-Line Control by Artificial Intelligence Methodology // Advanced Engineering Materials. 2007.9. № 1-2. 105-113.

Сперанский Сергей Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физическое материаловедение и технология новых материалов» Саратовского государственного технического университета

Speransky Sergey Konstantinovich – Candidate of Technical Science, senior lecturer chair «Physical substance and technology new materials» the Saratov State Technical University

Сперанский Константин Сергеевич – менеджер акционерного предприятия «АЛСиТЕК», г. Саратов

Speransky Konstantin Sergeevich – manager corporate enterprise «ALS&TEC», Saratov

Статья поступила в редакцию 16.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.793

С.М. Шевченко

ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕРОДА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ АЛМАЗНО-ИСКРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ

Представлены результаты исследования распределения углерода в поверхностном слое углеродистой стали после алмазно-искрового шлифования (АИШ). Проанализированы основные механизмы упрочнения поверхностного белого слоя.

Алмазно-искровое шлифование, белый слой, бесструктурный мартенсит, АИШ-упрочнение, диффузия

S.M. Shevchenko

CONCENTRATION CHANGES OF CARBON IN STEEL COATING SURFACE IN THE PROCESS OF DIAMOND-SPARK GRINDING

This paper presents findings of carbon distribution in coating surface after diamond – spark grinding (DSG). The main mechanisms of surface white layer hardening are analyzed.

Diamond-spark grinding, white layer, structureless martensite, DSG-hardening, diffusion

В работе представлены результаты исследования характера распределения важнейшей характеристики, определяющей прочность и износостойкость стальных деталей, – концентрации углерода в поверхностном слое стали в процессе АИШ-упрочнения.

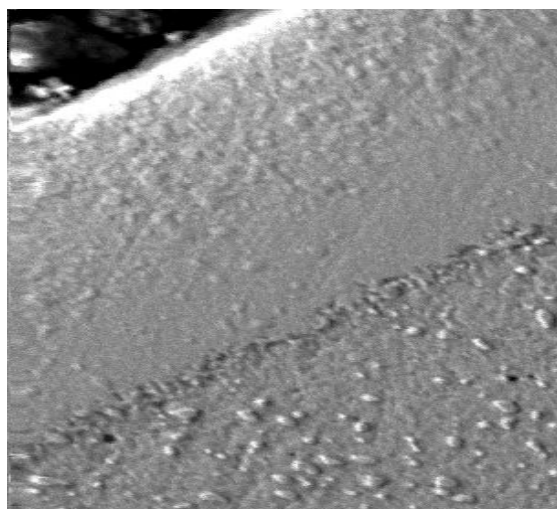
В качестве модели привлекалась наиболее структурно чувствительная углеродистая сталь У12 в состоянии после закалки и низкого отпуска и прошлифованной АИШ по наиболее теплонапряженному режиму.

Исследование распределения содержания углерода по глубине поверхностного слоя стали У12 проводилось на растровом электронном микроскопе путём прямого замера величины импульса, отраженного от определенной точки поверхностного слоя. Содержание углерода определялось по величине импульса в сравнении с эталоном, представляющим собой чистый графит. Микроструктура проанализированного участка представлена на рис. 1. По данным расчета содержания и распределения углерода по точкам, расположенным в различных участках поверхностного слоя по сечению образца стали У12 после АИШ, построен график распределения углерода по глубине (рис. 2).

Как уже ранее было установлено [1], структура и свойства поверхностного слоя углеродистых сталей после АИШ-упрочнения делится на три основные зоны (рис. 1а):

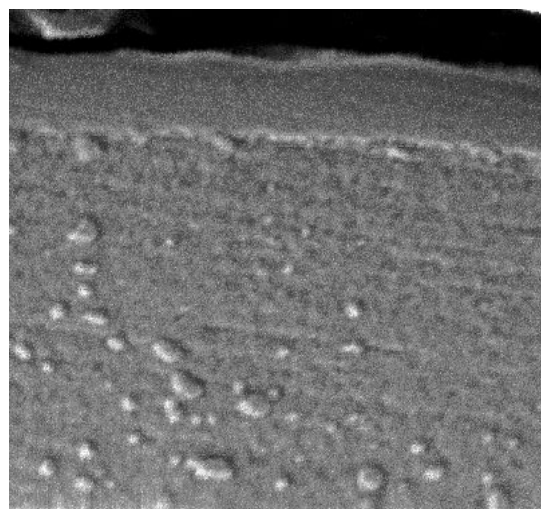
- 1) зона белого слоя высокой твердости, состоящая из бесструктурного мартенсита;
- 2) зона темной, отпущенной структуры тростита с пониженной твердостью;
- 3) зона структуры троосто-мартенсита, переходная зона к структуре основного металла (мартенсит отпуска + карбиды).

По характеру распределения твердости и концентрации углерода по глубине поверхностного слоя, отмечается крайняя неравномерность. Концентрация углерода стали У12 на глубине 110 мкм и дальше в глубь образца соответствует 1,2 % углерода, что подтверждает корректность данного исследования. На самой поверхности образца содержание углерода соответствует максимальному значению до 7,1 % на глубине 6,4 мкм. На глубине 10 мкм концентрация углерода составляет 3,2 %, а на глубине 20 мкм – 1,5 %. При этом в микроструктуре белого слоя практически не отмечается наличие карбидов цементита по причине их растворения и перехода в твердый раствор.



а

x 1000



б

x 1700

Рис. 1. Поверхностный слой стали У12 после алмазно – искрового шлифования:
а – общий вид упрочненного поверхностного слоя; б – зона диффузионного насыщения углеродом поверхности белого слоя (гладкий участок)

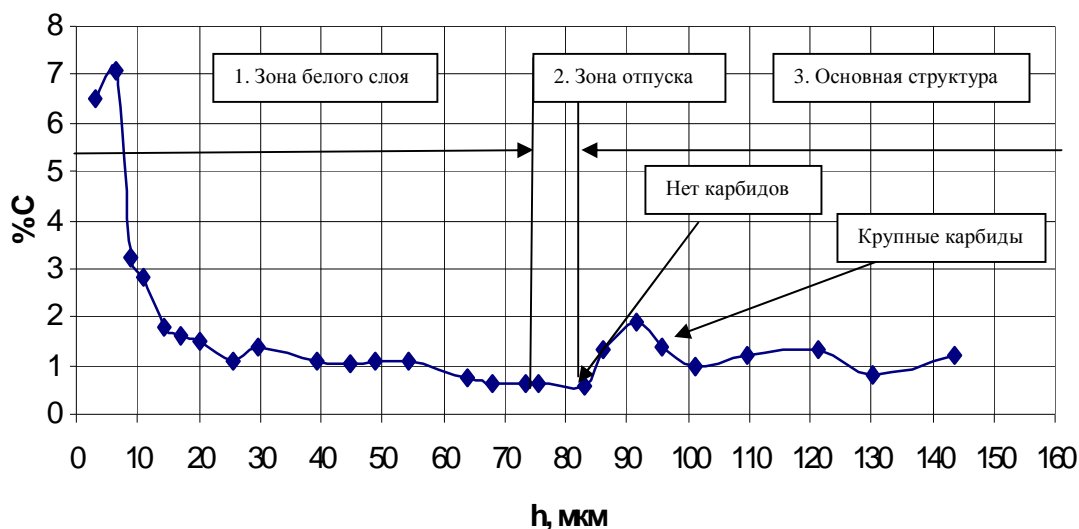


Рис. 2. Содержание углерода по глубине поверхностного слоя стали У12 после алмазно-искрового шлифования

При импульсном высокоскоростном нагреве, характерном для АИШ, весь углерод переходит в матрицу (γ) твердого раствора. Пересыщенное состояние фиксируется при интенсивном охлаждении, происходят упрочнение, закалка поверхностного слоя стали.

Далее по глубине концентрация углерода понижается относительно своего исходного значения 1,2 % и достигает минимального значения 0,58 % на глубине 83 мкм. По-видимому, данный участок образца служит поставщиком дополнительного углерода для близлежащих участков, имеющих повышенную его концентрацию. Данное предположение подтверждается последующим резким скачком повышения концентрации до 1,8 %, на глубине 92 мкм. На глубине свыше 100 мкм содержание углерода соответствует своему исходному значению 1,2 %.

Глубина белого слоя в данном образце 65 - 70 мкм. Поверхностный слой значительно пересыщен углеродом на глубине до 20 мкм. Причина такой высокой концентрации – диффузия углерода из углеродосодержащей среды обработки [2-4], в рассматриваемом случае средой служит алмазный круг. В других случаях средой может быть углеродосодержащая СОЖ, углеродосодержащая бакелитовая связка [5], чугунные доводочные диски [6, 7] и др. Таким образом, поверхностный слой обогащен углеродом по механизму его диффузионного насыщения, это явление носит название «трибоцементация», которое ввел проф. В.Г. Куранов [6, 7].

Характер распределения твердости иллюстрируется на рис. 3.

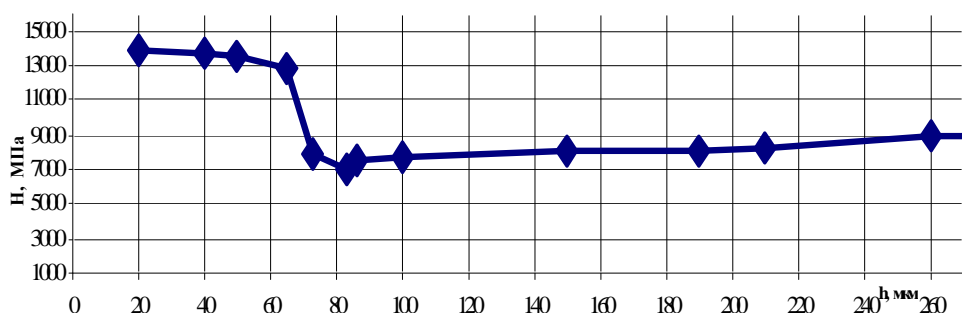


Рис. 3. Микротвердость стали У12 после АИШ

Твердость зоны упрочнения составляет 13800 МПа ($h = 20$ мкм). По глубине поверхностного слоя концентрация углерода понижается, а твердость остается высокой 13700 –

13000 МПа ($h = 40 - 65$ мкм). Значит, здесь действует другой механизм упрочнения. По общепринятому мнению [8-10], высокие значения твердости объясняются крайней дисперсностью структуры, измельчением зерна вплоть до аморфного состояния и практически полного растворения карбидов. Именно здесь формируется структура белого слоя – бесструктурный мартенсит.

Второй скачок повышения концентрации углерода находится под или ниже структуры, которая определяется как структура отпуска: троосто-мартенсит с твердостью 7000 – 7500 МПа. В интервале этого участка не наблюдается наличие карбидов цементита. Эта зона соответствует минимальному содержанию углерода (см. график на рис. 2), отдающая (поставляющая) углерод для близ лежащих участков. Отсюда последующий второй скачок концентрации (до 1,8 %), которому соответствует на микроструктуре зона с крупными карбидами цементита, их размеры значительно больше, чем карбиды, находящиеся в исходной структуре (сердцевине). Таким образом, коагуляция карбидов происходит за счет диффузии углерода из выше находящихся участков образца. Твердость этой зоны с крупными карбидами порядка 7500 - 7700 МПа. На глубине свыше 100 мкм, значение твердости изменяется, постепенно приближаясь к исходному значению 9000 МПа, концентрация углерода данного участка соответствует своему исходному значению 1,2 %.

Выводы

1. Значительное повышение твердости поверхностного упрочненного слоя стали У12 на глубине до 10-15 мкм обусловлено диффузией углерода из алмазного круга (трибоцементацией).
2. Высокие значения твердости поверхностного слоя на глубине более 15 мкм объясняются другими механизмами упрочнения: увеличением микродеформации (несовершенств кристаллического строения) и дисперсности структуры, а также диффузией из нижележащих слоев образца.
3. Полученные результаты для модельной стали У12 можно распространить на все углеродистые стали, обработанные методом АИШ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Импульсное упрочнение стали в процессе алмазно-искрового шлифования / Н.А. Погребной, С.М. Шевченко, С.А. Дитиненко, Ю.Г. Гуцаленко // Резание и инструмент в технологических системах: сб. ст. Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. Вып 68. С. 323-327.
2. Семко М.Ф. О физико-механическом взаимодействии алмаза с обработанными инструментами / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко // Станки и режущие инструменты: сб. ст. Харьков: ХГУ, 1969. Вып. 10. С. 103-108.
3. Ножнина А.В. Сущность взаимодействия алмаза с металлами / А.В. Ножнина, В.Н. Костиков, М.А. Маурах // Теория и практика алмазной обработки: М.: НИИМАШ, 1969. Вып 10. С. 19-25.
4. Фукс М.Я. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльборовый обработки / М.Я. Фукс, Н.К. Беззубенко, Б.Н. Свердлова. Киев: Вища школа, 1979. 160 с.
5. Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: дис.... д-ра техн. наук / Н.К. Беззубенко. Харьков: ХГПУ, 1995. 200 с.
6. Влияние среды и свойств материалов на упрочняющее действие и активацию процессов при пластической деформации и трении / В.Г. Куранов, А.Н. Виноградов, А.В. Бузов, Ю.А. Петров, В.А. Каракозова // МЕТАЛЛДЕФОРМ'99: сб. материалов 1-й Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 1999. С. 122-126.
7. Куранов В.Г. Движение без трения и износа: учеб. пособие / В.Г. Куранов, А.Н. Виноградов. Саратов: СГТУ, 2007. 49 с.

8. Дьяченко С.С. Физические основы прочности металлов / С.С. Дьяченко, В.Б. Рабухин. Харьков: Изд-во при Харьковском государственном университете издательского объединения «Вища школа», 1982. 199 с.

9. Палатник Л.С. Структура и динамическая долговечность сталей в условиях тяжелого нагружения / Л.С. Палатник, Т.М. Равицкая, Е.Л. Островская. Челябинск: Metallurgy, Челяб. отд-ние, 1988. 160 с.

10. Кудлай А.С. Перераспределение углерода в микрообъемах стали под влиянием импульсов фазовых напряжений / А.С. Кудлай, Ж.А. Дементьева // Металлознание та обробка металів. 2006. №3. С. 24-28.

Шевченко Светлана Михайловна – ассистент кафедры «Материаловедение» Харьковского Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», соискатель кафедры «Автоматизация производственных процессов» Волгоградского государственного технического университета

Shevchenko Svetlana Michailovna – Assistant of the Department of «Material authority» of National Technical University «Kharkiv polytechnical institute», seeker of the Department of «Automated Production Processes» of Volgograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 11.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.793

А.Б. Штейнгауэр, А.А. Фомин, В.Н. Лясников

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ИНДУКЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАЛОГАБАРИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С БИОСОВМЕСТИМЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Описана конструкция и основные характеристики оборудования индукционно-термической обработки малогабаритных медико-технических изделий, используемых в стоматологии и имплантологии. Рассматривается перспективная технология нанесения плазменных биосовместимых наноструктурированных покрытий с применением предварительного нагрева основного металла внутрикостных имплантатов.

Плазменно-индукционное напыление, биосовместимое покрытие, гидроксиапатит, наноструктура, внутрикостный имплантат

A.B. Steinhauer, A.A. Fomin, V.N. Liasnikov

EQUIPMENT AND TECHNOLOGY FOR INDUCTION HEATING PROCESSING OF SMALL-SIZED METALLIC PRODUCTS WITH BIOCOMPATIBLE COATINGS

Construction and basic characteristics of equipment for induction heating of small-sized medical and technical products used in dentistry and oral implantology are described in the article. A promising technology of biocompatible nanostructured plasma sprayed coatings deposition using pre-heating of intraosseous implants metal base is discussed.

Plasma induction spraying, biocompatible coating, hydroxyapatite, nanostructure, intraosseous implant

Введение

К одним из главных свойств газотермических покрытий внутрикостных имплантатов можно отнести морфологическую гетерогенность микроструктуры и однородность наноструктуры. При электроплазменном напылении биосовместимых гидроксиапатитовых (ГА) покрытий протекают структурно-фазовые превращения, изменяющие исходную структуру материалов вследствие неконгруэнтного плавления и аморфизации при затвердевании на металлической основе [1]. Для таких медицинских изделий, как внутрикостные имплантаты, указанные явления приводят к непредсказуемым скоростям резорбции биосовместимых остеокондуктивных ГА покрытий и снижению их механических свойств [2]. Устранить эти нежелательные явления можно при создании условий:

- облегченного растекания сплэтов (напыленных частиц) по поверхности изделия;
- сниженной скорости охлаждения, задаваемой уровнем энергии теплофизических процессов в контакте «сплэт-основа».

В связи с вышеуказанной целью работы является разработка оборудования и соответствующей технологии нанесения ГА покрытий с однородной наноструктурой за счет использования предварительного нагрева основного металла малогабаритных медицинских изделий с применением разработанного устройства индукционно-термической обработки. При этом определяются характеристики нагрева титановых пластинчатых образцов внутрикостных имплантатов и выявляются показатели наноструктуры ГА покрытий, сформированной при различных режимах термической активации основного металла.

Методика эксперимента

Образцы представляют собой пластины титанового сплава ВТ1-00 толщиной 2 мм. Нанесение ГА покрытий осуществляется электроплазменным напылением в воздушной среде на установке ВРЕС 744.3227.001 при дистанции напыления 110 ± 20 мм, токе дуги плазматрона 540 А, напряжении 30 В, дисперсности частиц порошка менее 90 мкм (рис. 1). Определялось влияние термической активации основы на показатели наноструктуры перед напылением покрытий в диапазоне температуры 20...600 °С.

Методы исследования структурного состояния образцов в нанометровом масштабе предусматривали определение размера зерен поверхности ГА покрытий, сформированных при различных режимах. При этом использовался сканирующий мультимикроскоп СММ-2000 в контактном режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ). Область сканирования варьировалась в диапазоне $(0,5 \dots 0,7) \times (0,5 \dots 0,7)$ мкм².

Устройство индукционно-термической обработки (активации) содержит в своем составе блок питания основной (БПО), генераторный блок (ГБ) и вспомогательный блок (ВБ) (рис. 2). БПО обеспечивает функционирование ГБ, питающего индуктор переменным током с частотой f от 50 до 200 кГц, обеспечивающей наибольшую скорость нагрева в резонансном режиме. Драйвер ГБ питается стабилизированным напряжением +15 В от БПО, выходной каскад, выполненный на схеме полумостового типа, – постоянным напряжением +300 В от БПО. ВБ обеспечивает напряжение +12 В для питания вентилятора М1 принудительного охлаждения ГБ, насоса М2 и вентилятора М3 системы водяного охлаждения индуктора (рис. 2).

Конструктивные решения БПО и ВБ соответствуют имеющимся нормативным требованиям ГОСТ 12.2.007.0-75.

Процесс термической активации титановой основы осуществляется в керамическом муфеле. В данной схеме нагрева и напыления титановый образец располагается в муфеле перпендикулярно оси плазматрона (рис. 1). По завершении процесса напыления образец извлекается из муфеля с последующим спокойным охлаждением.

Температура и скорость нагрева титановой основы при индукционном нагреве определялись при различной величине электропотребления (рис. 4). Показатели величины и скорости нагрева были получены с применением бесконтактного метода измерения температу-

ры при использовании ИК пирометра DT-8828 с пределом измерения от -50 до 1100 °С, погрешностью ± 0,1 °С и пространственным разрешением 16:1 (рис. 3).

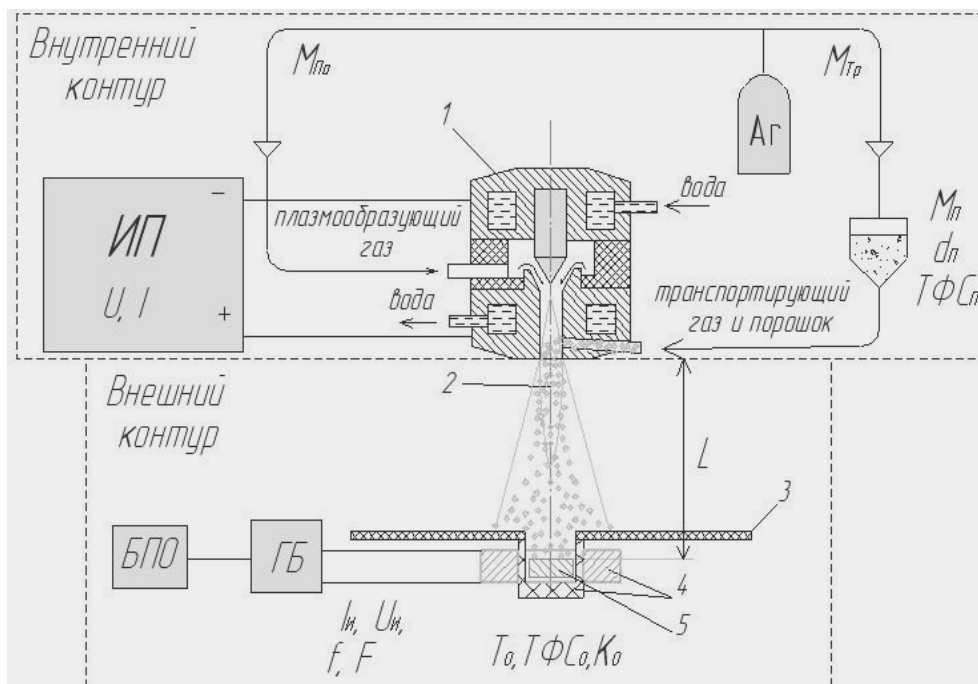


Рис. 1. Схема процесса плазменно-индукционного напыления. Внутренний контур: U, I – напряжение и ток плазматрона 1, подаваемые от источника питания ИП; $M_{по}$ и $M_{тр}$ – расход плазмообразующего и транспортирующего газа аргона; $M_{п}, d_{п}, TФC_{п}$ – расход, дисперсность и теплофизические свойства порошка. Внешний контур: L – дистанция напыления; $T_o, TФC_o, K_o$ – температура, теплофизические свойства и конструктивные особенности основы 5; 3 – экран защиты от потока плазмы 2 индуктора 4, питаемого напряжением U_i и током I_i с частотой f от устройства индукционного нагрева, включающего блок питания основной (БПО) и генераторный блок (ГБ); F – функция, зависящая от геометрии изделия и частоты f

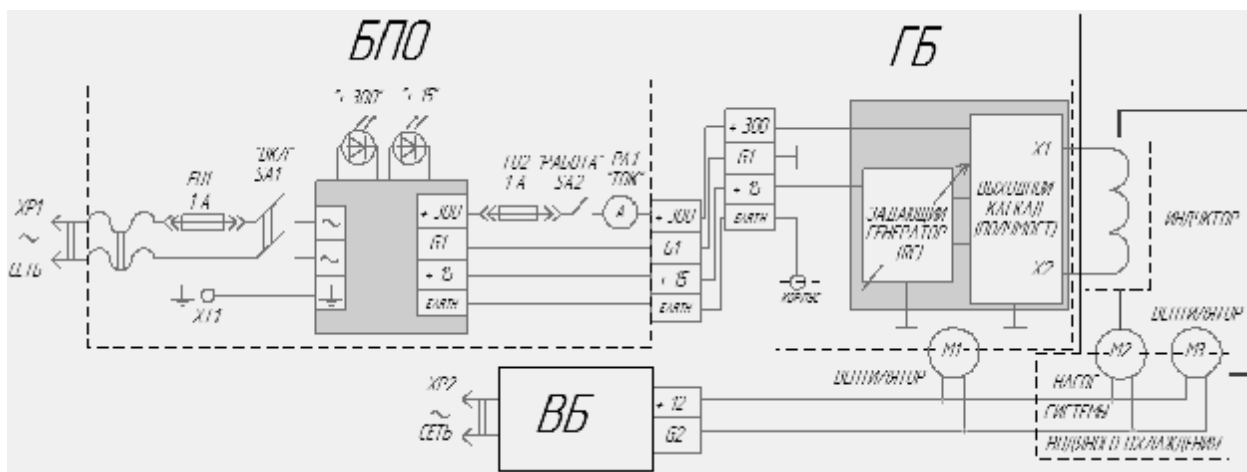


Рис. 2. Принципиальная схема устройства индукционного нагрева

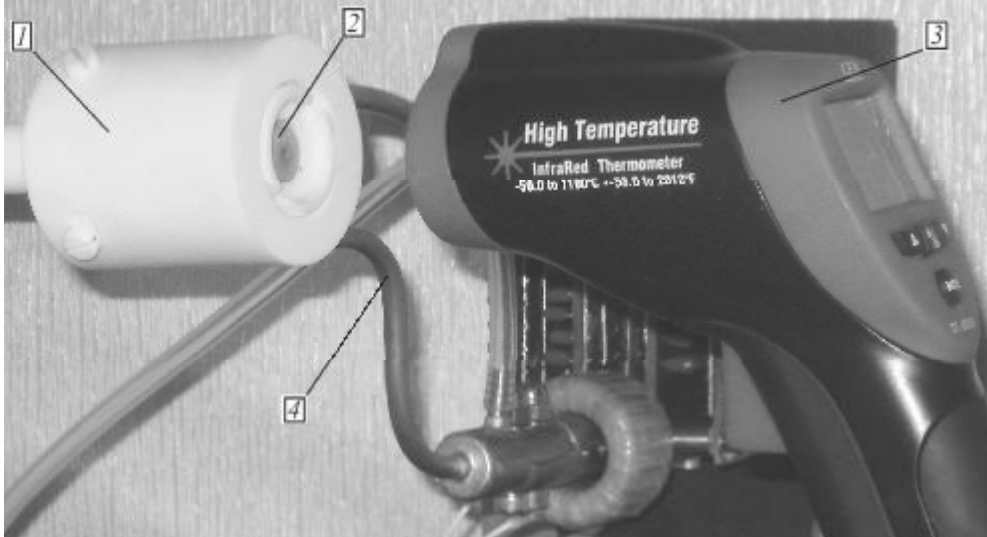


Рис. 3. Измерение температуры образцов бесконтактным методом:
1 – кожух муфеля индуктора 4 – с образцом 2; 3 – пирометр

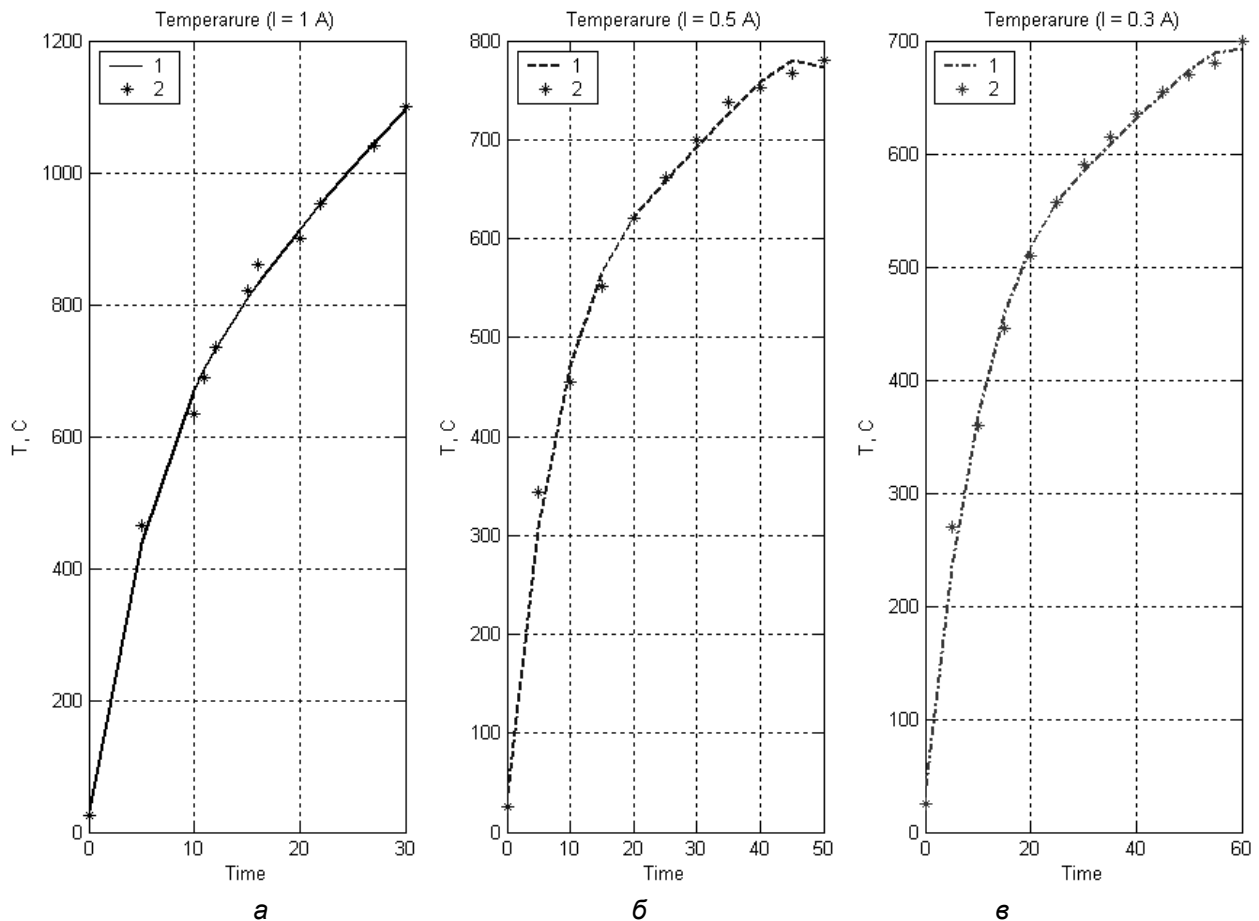


Рис. 4. Графики нагрева титановых пластинчатых образцов при различной величине силы тока:
а – 1,0 А; б – 0,5 А; в – 0,3 А; 1 – расчетная кривая; 2 – среднее арифметическое значение, полученное в ходе эксперимента

Соответствующие аппроксимированные кривые нагрева, полученные с использованием программного пакета MATLAB 6.0, представлены ниже:

$$T_{1,0A}=30,884+105,87 \cdot t-5,6844 \cdot t^2+0,16687 \cdot t^3-0,0018523 \cdot t^4$$

$$T_{0,5A}=38,713+67,116 \cdot t-2,9852 \cdot t^2+0,06472 \cdot t^3-0,00051981 \cdot t^4$$

$$T_{0,3A}=40,755+45,995 \cdot t-1,5683 \cdot t^2+0,02629 \cdot t^3-0,00016512 \cdot t^4$$

Нижний индекс показателя температуры T соответствует силе тока; t – время, с.

На графике рис. 4 *а* при длительности нагрева 16 секунд фиксируется возрастание отклонения расчетной кривой от экспериментального среднего значения, физический смысл которого связан с полиморфным превращением α -Ti в β -Ti. При значениях силы тока 0,5 А и 0,3 А (рис. 4 *б*, *в*) отклонения теоретической кривой от экспериментальных точек вызваны погрешностями аппроксимации.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Установлено, что температура предварительного нагрева основы (при одном значении электрической мощности плазменного напыления и дистанции напыления) оказывает наибольшее влияние на процессы взаимодействия частиц с основой и, как следствие, геометрические характеристики как микро-, так и нанометрового уровней структуры [1, 3, 4].

Образцы ГА покрытий, сформированных по традиционной технологии без предварительного нагрева основы, имеют высокую степень аморфизации [1]. В их структуре содержится большое количество мельчайших зерен овальной формы шириной 10 ± 2 нм и длиной 30 ± 10 нм, присутствует также большая доля укрупненных нанозерен со средним размером свыше 50 нм (рис. 5 *а*).

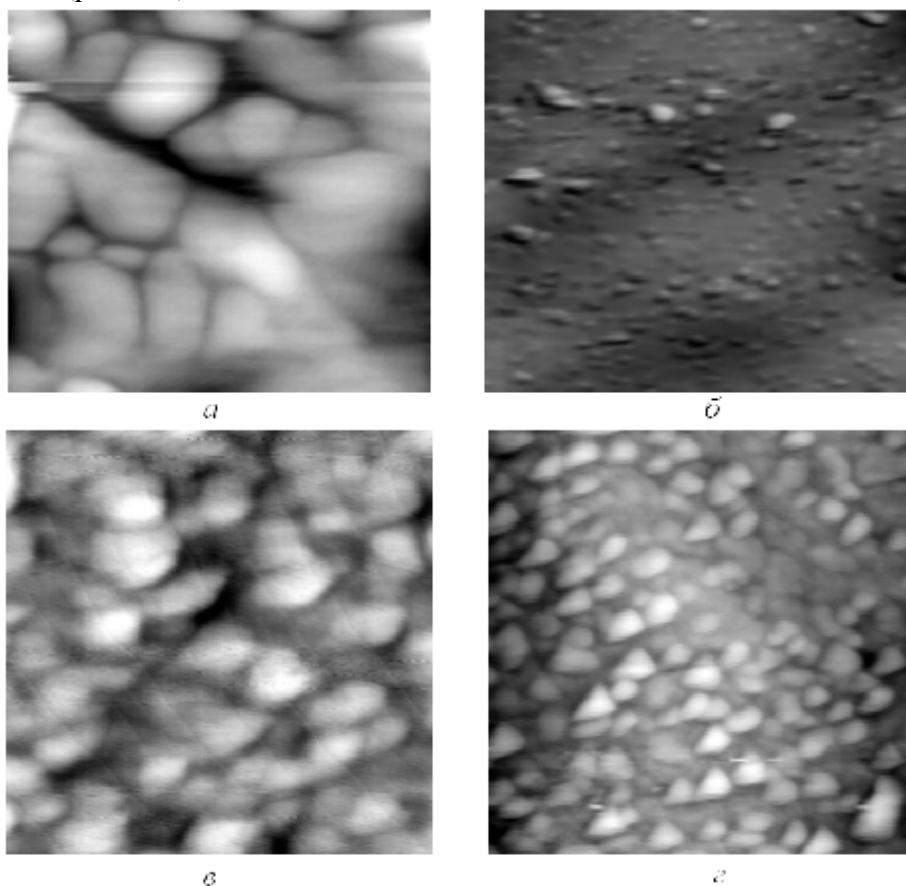


Рис. 5. АСМ ГА покрытий, полученных при следующих температурах предварительного нагрева основы: *а* – 20 °С (без воздействия; ширина кадра 572 нм); *б* – 400 °С (ширина кадра 570 нм); *в* – 500 °С (ширина кадра 646 нм); *г* – 600 °С (ширина кадра 632 нм)

При величине нагрева, равной 100 °С, параметры морфологии поверхности практически не отличаются от показателей, полученных без предварительного нагрева основы. При предварительном нагреве основы до 200 °С структура покрытий изменяется, формирует волнистый рельеф с впадинами и выступами, средний размер нанозерен возрастает до 24 нм. При нагреве до 300 °С выявляются новые типы структур, образуются округлые и вытянутые зерна шириной 40±10 нм и длиной 110±40 нм, а также «волокна» толщиной 60...70 нм. Снижение вязкости, вызванное нагревом до 400 °С, способствует лучшему растеканию сплэтов – микрочастиц покрытия (рис. 5 б). Поэтому закономерным является уменьшение среднего размера зерна до 25 нм, форма нанометровых зерен остается овальной с шириной 12,5±2,5 нм и длиной 30±10 нм. При температуре активации основы 500 °С формируются волокнистые образования толщиной 80...90 нм, субмикроструктурные зерна и пластинки со средним размером 150...200 нм, состоящие из нанометровых образований с нечеткой границей (рис. 5 в). Высокие температуры предварительной активации (600 °С), помимо снижения вязкости, улучшающей жидкотекучесть, запускают механизм роста отдельных субмикроструктурных волокон и блоков сплэтов, поверхностная структура которых равномерно представлена нанокристаллическими зернами овальной, округлой и вытянутой формы. Средний размер нанозерен достигает 46±20 нм (рис. 5 г). Следует отметить, что увеличение среднего размера нанозерен связано со снижением доли аморфной фазы, при этом уменьшается ее негативное влияние на качества биосовместимости покрытий и их механические свойства [1, 3].

Вывод

Плазменно-индукционный метод нанесения биокерамических ГА покрытий альтернативен традиционному плазменному напылению. Анализ полученных результатов свидетельствует об улучшении геометрических характеристик наноструктуры, которое заключается в необходимом изменении среднего размера зерен в растекшихся сплэтах, достижении большей равномерности распределения нанометровых образований по поверхности при сниженных значениях доли аморфной фазы, в том числе толщины межзеренных границ. Рекомендованный диапазон режимов формирования покрытий характеризуется температурой предварительной активации основы от 450 до 600 °С, дистанцией напыления от 90 до 130 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фомин А.А. Плазменно-индукционное получение титан-гидроксиапатитовых покрытий на дентальных имплантатах / А.А. Фомин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2008. № 2 (32). Вып. 1. С. 49-58.
2. Numerical simulation of hydroxyapatite powder behavior in plasma jet / S. Dyshlovenko, V. Pateyron, L. Pawlowski, D. Murano // Surface and Coating Technology 179 (2004). С. 110-117.
3. Фомин А.А. Плазменное напыление гидроксиапатитовых покрытий титановых имплантатов с нагревом основы / А.А. Фомин, В.Н. Лясников // Технология металлов. 2008. № 9. С. 26-29.
4. Фомин А.А. Структурообразование биокерамических напыленных покрытий, сформированных с предварительной индукционно-термической активацией основы имплантатов / А.А. Фомин, В.Н. Лясников // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. № 3 (48). Вып. 3. С. 94-98.

Штейнгауэр Алексей Борисович – соискатель кафедры «Физическое материаловедение и технология новых материалов» Саратовского государственного технического университета

Steinhauer Aleksey Borisovich – Applicant, Department of Physical Material Science and Technology of New Materials, Saratov State Technical University

Фомин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физическое материаловедение и технология новых материалов» Саратовского государственного технического университета

Fomin Aleksandr Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Physical Material Science and Technology of New Materials, Saratov State Technical University

Лясников Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физическое материаловедение и технология новых материалов» Саратовского государственного технического университета

Lyasnikov Vladimir Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chair, Department of Physical Material Science and Technology of New Materials, Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 04.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 615.47

А.В. Власов, А.А. Игнатъев

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ОПЕРАТОРАХ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Поставлена задача расчета электромагнитных полей в операторах систем с распределенными параметрами.

Электромагнитное поле, операторы систем с распределенными параметрами

A.V. Vlasov, A.A. Ignatiev

ESTIMATION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN OPERATORS OF SYSTEMS WITH THE DISTRIBUTED PARAMETERS

The problem of calculation of electromagnetic fields in operators of systems with the distributed parameters is put.

An electromagnetic field, operators of systems with the distributed parameters

Вектор напряженности магнитного поля $\vec{H} = 1 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ означает, что на расстоянии 1 метр от тонкого провода, по которому протекает ток 1 А, стрелка компаса повернется туда, куда направлен этот самый вектор \vec{H} . Эта теория «дальнодействия» приучила нас к тому, что есть провод с током и есть направления поворота стрелки компаса при его перемещении в пространстве вокруг провода с током. Если зафиксировать эти повороты стрелки, то получим поле векторов \vec{H} и, соответственно, поле векторов

$$\vec{B} = m_0 m \vec{H}, \quad (1)$$

где \vec{B} , Тл – магнитная индукция магнитного поля; $m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума); m – относительная магнитная проницаемость среды.

Основой расчетов электромагнитных полей является один из постулатов Максвелла [2]:

$$\text{rot} \vec{B} = \nabla \times \vec{B} = m_0 \vec{j}, \quad (2)$$

где \vec{j} – вектор поверхностной плотности тока, $\frac{\text{А}}{\text{м}^2}$.

Перспектива получения аналитического решения реальна только для известных координатных систем, поэтому распишем уравнение (2) в этих системах.

Декартовы координаты [3]:

$$\nabla \times \bar{B}(x, y, z) = \text{rot} \bar{B}(x, y, z) = \left(\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} \right) \bar{i} + \left(\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \right) \bar{j} + \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right) \bar{k} = m_0 \bar{J}(x, y, z). \quad (3)$$

Цилиндрические координаты [3]:

$$\nabla \times \bar{B}(r, j, z) = \text{rot} \bar{B}(r, j, z) = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial B_z}{\partial j} - \frac{\partial B_j}{\partial z} \right) \bar{i}_r + \left(\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r} \right) \bar{i}_j + \left[\frac{\partial(rB_j)}{\partial r} - \frac{\partial B_r}{\partial j} \right] \bar{i}_z = m_0 \bar{J}(r, j, z) \quad (4)$$

Сферические координаты [3]:

$$\nabla \times \bar{B}(r, q, j) = \text{rot} \bar{B}(r, q, j) = \frac{1}{r \sin q} \left[\frac{\partial(B_j \sin q)}{\partial q} - \frac{\partial B_q}{\partial j} \right] \bar{i}_r + \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\sin q} \cdot \frac{\partial B_r}{\partial j} - \frac{\partial(rB_j)}{\partial r} \right] \bar{i}_q + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial(rB_q)}{\partial r} - \frac{\partial B_r}{\partial q} \right] \bar{i}_j = m_0 \bar{J}(r, q, j) \quad (5)$$

Эти дифференциальные уравнения в частных производных необходимо решать, чтобы определить векторные поля магнитной индукции \bar{B} и напряженности \bar{H} . Как уже говорилось выше, существует много методов решения и все их объединяет отказ от физики в процессе решения задачи.

Идея заключается в том, что для решения подобных электротехнических задач использовать операторы систем с распределенными параметрами [4-6]. Структурная теория систем с распределенными параметрами (СРП) основана на том, что если есть функция возмущения в любом континууме пространства, то в каждом континууме того же пространства будет возникать функция отклика как реакция на возмущение. Если существует поле континуальных возмущений, то функция отклика в каждом континууме того же пространства будет отыскиваться по принципу суперпозиции. Это и есть реализация метода решения, называемого методом источников [7]. Уравнение (2) и его представление в различных системах координат (3)-(5) в классических уравнениях математической физики не рассматривается [8]. Однако модификации этого уравнения появились позже и достаточно широко представлены в [9].

По классификации [5] уравнение (2) и его и его представление в различных системах координат (3)-(5) относятся к группе (3.0.1) – где 3 – размерность пространственной области (максимальная); 0 – наивысший порядок производных искомой функции по независимой временной переменной t ; 1 – наивысший порядок производных искомой функции по пространственным переменным t .

В справочнике [5] приведены 500 краевых задач уравнений с полными и частными производными, а также операторы соответствующих СРП: функция Грина (импульсная переходная функция), нормирующая функция, континуальная передаточная функция. Приведем из [5] основные понятия операторной теории СРП.

Основной характеристикой СРП является континуальная передаточная функция. Она показывает отношение выходной функции к входной (по Лапласу) в привязке к конкретной точке.

В искомой задаче выходная функция будет обозначаться буквой $Q(x, t)$, где x – трехмерная переменная в декартовых, цилиндрических и сферических координатах; $f(x, t)$ – входная координата по среде, зависящая от трехмерной координаты x и времени t .

Основное уравнение задачи записывается в виде

$$l(Q(x, t)) = f(x, t); x \in D, t \geq t_0,$$

где l – так называемый оператор дифференциального уравнения – это формула преобразования выходной величины Q .

В каждой задаче определяются граничные или краевые условия

$$\Gamma(Q(x, t)) = g(x, t); x \in D, t > t_0,$$

где Γ – оператор граничных или краевых условий; g – входное воздействие на границе в каждый момент времени.

Для того, чтобы решить задачу во всей области координат, необходимо знать ее значения в каждой точке по границе области. Начальные условия для задачи записываются в виде

$$N(Q(x, t)) = Q_0(x); x \in D, t = t_0,$$

где N – оператор начальных условий; $Q_0(x)$ – значение искомой функции в заданный момент времени t_0 в каждой точке пространства x .

Получили систему

$$\begin{cases} l(Q(x, t)) = f(x, t); x \in D, t \geq t_0; \\ \Gamma(Q(x, t)) = g(x, t); x \in D, t > t_0; \\ N(Q(x, t)) = Q_0(x); x \in D, t = t_0. \end{cases} \quad (6)$$

Необходимо знать: значение функции на границе в каждый момент времени; значение в каждой точке области в момент времени t_0 .

В указанном виде (6) система практически неразрешима. Вводится в рассмотрение так называемая стандартная форма записи (6). Она подразумевает нулевые граничные и начальные условия. Ее вид:

$$\begin{cases} l(Q(x, t)) = w(x, t); x \in D, t \geq t_0; \\ \Gamma(Q(x, t)) = 0; x \in D, t > t_0; \\ N(Q(x, t)) = 0; x \in D, t = t_0. \end{cases} \quad (7)$$

где $w(x, t)$ – стандартизирующая функция.

$w(x, t) = f(x, t)$ при $\Gamma=0, N=0$ – входное воздействие на систему при нулевых граничных и начальных условиях и первая из трех основных функций, которая понадобится при решении (из справочника). Второй функцией является функция Грина (импульсная переходная функция, функция влияния, функция источника, функция веса).

Функцией Грина называется функция источника, которая равна выходному сигналу

$$G(x, t) = Q(x, t), \text{ при } f(x, t) = d(x - x) d(t - t),$$

где $d(x - x)$ – пространственная δ – функция по координатам x, y, z ; $d(t - t)$ – δ – функция по времени; x – координаты входного возмущения; x – координаты точки отклика от входного возмущения.

С учетом этого стандартная задача (7) переписывается в виде

$$\begin{cases} l(G(x, x, t, t)) = d(x - x) d(t - t); \\ \Gamma(G(x, x, t, t)) = 0; \\ N(G(x, x, t, t)) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

где функция Грина от $G(x, t)$ берется из справочника и является второй основной характеристикой.

Зная эти две характеристики, можно найти выходную функцию по следующему выражению:

$$Q(x, t) = \int_{t_0}^t \int_D G(x, x, t, t) w(x, t) dx dt \quad (9)$$

Если задача статическая, то есть отсутствует время t , то ее можно записать в виде:

$$\begin{cases} l(Q(x)) = f(x), x \in D; \\ \Gamma(Q(x)) = g(x), x \in \partial D; \\ N \equiv 0. \end{cases} \quad (10)$$

Стандартная форма записи будет выглядеть в виде

$$\begin{cases} l(Q(x)) = w(x), x \in D; \\ \Gamma(Q(x)) = 0, x \in \partial D. \end{cases} \quad (11)$$

при однородных (нулевых) граничных условиях.

Функция Грина такой задачи удовлетворяет системе уравнений:

$$\begin{cases} l(G(x, x)) = d(x - x), x \in D, x \in D; \\ \Gamma(G(x, x)) = 0, \end{cases} \quad (12)$$

где x – координаты возмущения; x – координаты отклика.

Решение задачи в этом случае выглядит следующим образом:

$$Q(x) = \int_D G(x, x)w(x)dx. \quad (13)$$

Бывают задачи, в которых отсутствуют пространственные координаты, т.е. процесс чисто временной. В таком случае задача записывается следующим образом:

$$\begin{cases} l(Q(t)) = f(t), t > t_0; \\ N(Q(t)) = Q_0. \end{cases} \quad (14)$$

Стандартная форма записи:

$$\begin{cases} l(Q(t)) = w(t), t \geq t_0; \\ N(Q(t)) = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Функция Грина:

$$\begin{cases} l(G(t, t)) = d(t - t); \\ N(G(t, t)) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Решение такой задачи имеет вид:

$$Q(t) = \int_{t_0}^t G(t, t)w(t)dt. \quad (17)$$

Таким образом, для решения этой задачи принципиально достаточно трех формул (9), (13), (17), то есть по двум справочным функциям (нормирующей и Грина) можно всегда определить выходную функцию Q .

Для цели управления и синтеза системы управления, исходя из ТАУ, необходимо знать передаточную функцию. В теории СРП вводится понятие так называемой континуальной передаточной функции, т.е. точечной передаточной функции, в пределах области D , когда возмущение подается на среду в точке x функциями: $d(x - x)$ и $d(t - t)$, а реакция регистрируется в точке x .

Континуальная передаточная функция выражается следующим образом:

$$W(x, x, p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} \cdot G(x, x, t)dt. \quad (18)$$

По сути, континуальная передаточная функция – это преобразование Лапласа функции Грина, т.е. при этих функциях континуальная передаточная функция является производной и всегда может определиться по функции Грина.

Таким образом, для решения задачи по СРП необходимо знать две функции: нормирующую функцию Грина.

Теория СРП включает так называемый структурный метод ТАУ, который подразумевает операции с распределенными блоками: блоки соединяются последовательно; блоки соединяются параллельно; включение второго блока в обратную связь.

В связи с этим вводится понятие операторного изображения выходной величины. В теории распределенных блоков выходная величина определяется следующим образом:

$$\bar{Q}(x, p) = \int_D W(x, x, p) \bar{w}(x, p) dx, \quad (19)$$

где $\bar{Q}(x, p)$ – изображение по Лапласу выходной величины решаемой задачи; $W(x, x, p)$ – континуальная передаточная функция; $\bar{w}(x, p)$ – изображение по Лапласу нормирующей функции.

Если удастся из нормирующей функции $\bar{w}(x, p)$ выделить в явном виде компоненту входной координаты с помощью специальных средств или методов

$$\bar{w}(x, p) = \bar{w}_1(x, p) \cdot \bar{f}(x, p), \quad (20)$$

то уравнение (19) переписывается в виде

$$\bar{Q}(x, p) = \int_D W(x, x, p) \cdot \bar{w}_1(x, p) \cdot \bar{f}(x, p) dx \quad (21)$$

С помощью двух способов (коэффициент разложения и коэффициент приближения), по возможности вынося входное возмущение (по Лапласу) за знак интегрирования, получим

$$W_f(x, p) = \frac{\bar{Q}(x, p)}{\bar{f}(x, p)} = \int_D W(x, x, p) \cdot \bar{w}_1(x, p) dx \quad (22)$$

Полученное выражение (22) – отношение изображения по Лапласу выходной величины к изображению по Лапласу входного возмущения, как интеграл по области D континуальных функций, называется интегральной передаточной функцией [9, 10].

Дадим анализ [5] по содержанию краевых задач по уравнению (2) и его и его представлений в различных системах координат (3)-(5).

Группа (1.0.1)

$$b_0(x) \frac{dQ(x)}{dx} + b_1(x) Q(x) = f(x) \quad (23)$$

Группа (1.1.1)

Приводится 4 уравнения вида (с различными начальными и граничными условиями):

$$a \frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} + b \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} + c Q(x, t) = f(x, t) \quad (24)$$

Это позволяет, во-первых, проверить правильность предложенного метода расчета магнитных полей. Задача одномерная, но для оценки метода расчета это как раз то, что требуется без лишних временных потерь на решение задачи. Оценочным критерием точности моделирования будет, естественно численное моделирование в пакетах *Mathlab*, *Femlab*. Во-вторых, справочник [5] был издан в 1979 году и, естественно, даже на тот момент времени не мог включить все решенные краевые задачи. Прошло 30 лет и велика вероятность того, что появились новые аналитические решения. Так что надо искать решения краевых задач групп (3.0.1), (3.1.1), (2.0.1), (2.1.1), (1.0.1), (1.1.1).

Возвращаясь к уравнению вида (24) из [5] (четвертое уравнение из группы), будем иметь:

$$a \frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} + b \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} + c Q(x, t) = f(x, t) \quad (24)$$

$$Q(x,0) = Q_0(x); Q(0,t) = g(t); x \geq 0; t \geq 0; a > 0; b > 0; c > 0.$$

Нормирующая функция:

$$w(x,t) = f(x,t) + a(x)Q_0(x)d(t) + bd(x)g(t) \quad (25).$$

Функция Грина:

$$G(x,x,t) = 1(x-x) \frac{1}{b} \exp \left[-\int_x^x \frac{c(x)}{b} dx \right] d \left[1 - \int_x^x \frac{a(x)}{b} dx \right] \quad (26)$$

Континуальная передаточная функция:

$$W(x,x,p) = 1(x-x) \frac{1}{b} \exp \left[-\frac{1}{b} \int_x^x [a(x)p + c(x)] dx \right] \quad (27)$$

Сопоставляя (2) и (24), будем иметь:

$$f(x,t) = m_0 j; Q(x,t) = B_x(x,t).$$

В соответствии с (9) получим:

$$B_x(x,t) = \int_{t_0}^t \int_x^x G(x,x,t) \cdot w(x,t) dx dt = \int_{t_0}^t \int_x^x 1(x-x) \frac{1}{b} \exp \left[-\int_x^x \frac{c(x)}{b} dx \right] d \left[1 - \int_x^x \frac{a(x)}{b} dx \right] \cdot [f(x,t) + a(x)Q_0(x)d(t) + bd(x)g(t)] dx dt \quad (28)$$

В данном случае принцип суперпозиции соблюдается интегрированием по области изменения переменной x , т.е. источник с током в каждой точке x создает магнитную индукцию $B_x(x,t)$. Если же нас будет интересовать функция отклика возмущения $f(x,t) = m_0 j$, помещенного в точку x , мы получим ее в точке x по выражению континуальной передаточной функции (27):

$$W(x,x,p) = 1(x-x) \frac{1}{b} \exp \left[-\frac{1}{b} \int_x^x [a(x)p + c(x)] dx \right].$$

Это все, что требуется для нахождения картины поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей: сб. докл. 9 Междунар. науч. конф. СПб: СПбГУ, 2009. 380 с.
2. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма: учеб. пособие / И.Е. Иродов. М.: Высш. шк., 1991. 288 с.
3. Корн Г Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Е. Корн. М.: Наука, 1978. 720 с.
4. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. М.: Наука, 1975. 568 с.
5. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. Справочник / А.Г. Бутковский. М.: Наука, 1979. 224 с.
6. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами / Э.Я. Рапопорт. М.: Высш. шк., 2003. 299 с.
7. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. М.: Наука, 1972. 736 с.
8. Араманович И.Г. Уравнения математической физики / И.Г. Араманович, В.И. Левин. М.: Наука, 1969. 288 с.
9. Власов В.В. Синтез интегральной передаточной функции для объектов управления с распределенными параметрами. Школа академика Власова / В.В. Власов. Вып. 1. М.: Буркин, 1998, С. 65-127.

10. В.В.Власов. Физика в уравнениях математической физики / В.В. Власов // Векторная энергетика в технических, биологических и социальных системах: докл. 5 Рос. науч. конф. СООО «АН ВЭ». Саратов, 2002. С. 3-10.

Власов Андрей Вячеславович – кандидат технических наук, докторант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Vlasov Andrey Vyacheslavovich – Candidate of Technical Sciences, doctoral candidate of the Department of «Automation and management of technological processes» of the Saratov State Technical University

Игнатьев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета.

Ignatyev Aleksandr Anatolyevich – Doctor of technical sciences, professor, head. Department «Automation and management of technological processes» the Saratov state technical university

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 681.587.344.7

А.К.Демидов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

Рассмотрены физические модели типовых процессов механообработки, учитывающие упругость технологической системы и износ инструмента. На основе передаточных функций процессов лезвийной обработки и врезного шлифования получены схемы в переменных состояниях. Из рассмотрения схем определены матрицы перехода и математические модели процессов в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка.

Точение, шлифование, физическая модель, пространство состояний, математическая модель

A.K. Demidov

SIMULATION OF STANDARD PROCESSES OF THE METAL WORKING

Physical models of standard processes the machining considering elasticity of technological system and deterioration of the instrument are considered. On the basis of transmitting functions of processes handlings and grindings are received circuits in condition variables. From consideration of circuits matrixes of transition and mathematical models of processes in the form of system of the differential equations of the first order are defined.

Grinding, physical model, the problem space, mathematical model

Математические модели, отражающие связь управляющих воздействий с контролируемыми технологическими параметрами, могут быть построены на основе эмпирических зависимостей, применяемых для оптимизации режимов резания [1, 2]. Такие модели рассматривают процесс обработки как безынерционный и стационарный.

Возрастающие требования к точности обработки вызывают необходимость управления упругими перемещениями в технологической системе станка путем изменения значений скорости резания или подачи, а значит и скорости соответствующих приводов. В процессе резания неравномерность припуска и твердости заготовки приводят к неравномерности сил резания и, как следствие, к вынужденным изменениям упругого перемещения инструмента.

Так, при точении отклонения Δ_{PY} радиальной составляющей P_Y вызывают вынужденные колебания упругого перемещения инструмента y относительно статического значения по нормали к поверхности резания (рис. 1)

$$\frac{d\Delta_{PY}}{dt} + \frac{1}{T_P} \Delta_{PY} = \frac{K_P}{T_P} y, \quad (1)$$

где Δ_{PY} – отклонение P_Y от ее статического значения; T_P – постоянная времени процесса резания; K_P – коэффициент, связывающий P_Y и y .

Применяя прямое преобразование Лапласа к обеим частям уравнения с начальными условиями $\Delta_{PY}(0)$, получим

$$p\Delta_{PY}(p) - \Delta_{PY}(0) + \frac{1}{T_P} \Delta_{PY}(p) = \frac{K_P}{T_P} Y(p). \quad (2)$$

После преобразования находим

$$\Delta_{PY}(p) = \frac{K_P}{T_P(p + \frac{1}{T_P})} Y(p) + \frac{1}{p + \frac{1}{T_P}} \Delta_{PY}(0) \quad (3)$$

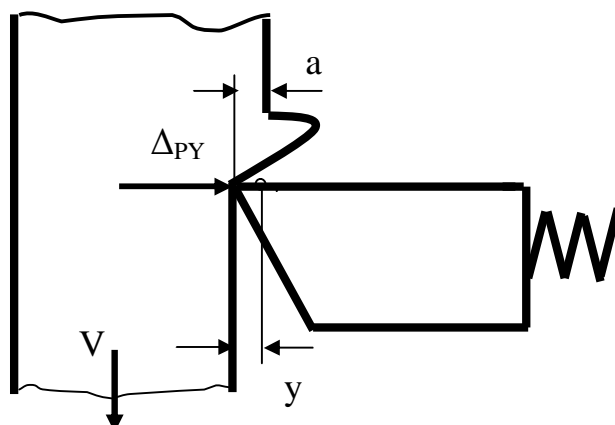


Рис. 1. Физическая модель процесса точения

Схема системы в переменных состояния [3] для случая, когда входное воздействие $y(t)$ имеет вид единичной ступенчатой функции, представлена на рис. 2.

Из рассмотрения схемы на рис. 2 имеем

$$f_{11}(t) = L^{-1} \left\{ \frac{1}{p} \right\} = 1, \quad (4)$$

$$f_{21}(t) = L^{-1} \left\{ \frac{K_P}{T_P p(p + \frac{1}{T_P})} \right\} = K_P (1 - e^{-\frac{1}{T_P} t}), \quad (5)$$

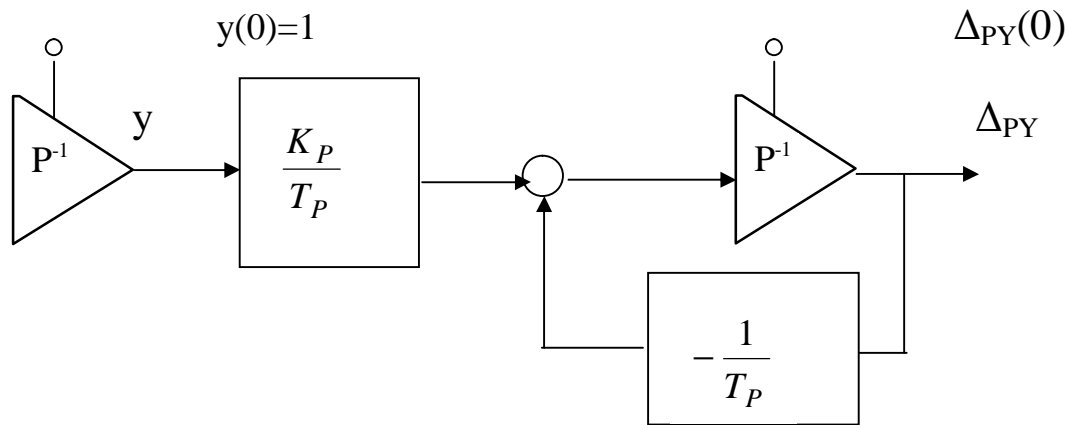


Рис. 2. Схема переменных состояния для процесса точения

$$f_{12}(t) = 0, \tag{6}$$

$$f_{22}(t) = L^{-1} \left\{ \frac{1}{p + \frac{1}{T_P}} \right\} = e^{-\frac{1}{T_P}t}. \tag{7}$$

Получаем переходную матрицу системы

$$\Phi(t) = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ K_P(1 - e^{-\frac{1}{T_P}t}) & e^{-\frac{1}{T_P}t} \end{vmatrix}. \tag{8}$$

Реакцию системы на входное воздействие в виде ступенчатой функции находим в виде

$$\Delta_{PY}(t) = K_P(1 - e^{-\frac{1}{T_P}t})y(0) + e^{-\frac{1}{T_P}t} \Delta_{PY}(0). \tag{9}$$

Полагая, что вынужденные колебания упругого перемещения y приводят к эквивалентному по силовому эффекту изменению толщины срезаемого слоя a , связанного с подачей, можно целенаправленно управлять процессом резания.

Рассмотрим физическую модель процесса врезного шлифования, учитывающую упругость технологической системы и размерный износ инструмента (рис.3).

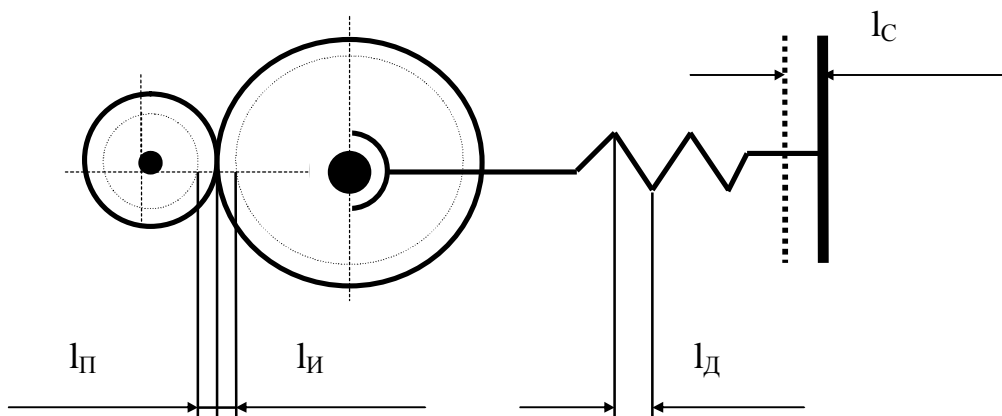


Рис. 3. Физическая модель процесса врезного шлифования

Связь величины снятого припуска с величиной перемещения суппорта определится соотношением

$$\Delta l = V_{\text{п}} \cdot t - \Delta l_{\text{и}} - \Delta l_{\text{д}}, \quad (10)$$

где Δl – величина перемещения суппорта инструмента; $\Delta l_{\text{п}}$ – величина снятого припуска; $\Delta l_{\text{и}}$ – величина компенсации износа шлифовального круга; $\Delta l_{\text{д}}$ – величина упругой деформации технологической системы.

Продифференцировав выражение (10), получим

$$V_{\text{д}} = V_{\text{п}} - V_{\text{и}} - V_{\text{д}}, \quad (11)$$

где $V_{\text{с}}$, $V_{\text{п}}$, $V_{\text{и}}$, $V_{\text{д}}$ – скорости изменения $l_{\text{с}}$, $l_{\text{п}}$, $l_{\text{и}}$, $l_{\text{д}}$.

Зависимость $V_{\text{и}}=f(V_{\text{п}})$ аппроксимируется выражением [4]

$$V_{\text{и}} = a_1 V_{\text{п}} + a_2 V_{\text{п}}^2, \quad (12)$$

где a_1 , a_2 – коэффициенты аппроксимации.

Связь между $V_{\text{д}}$ и $V_{\text{п}}$ может быть определена соотношением

$$V_{\text{д}} = a_3 V_{\text{п}}, \quad (13)$$

где a_3 – коэффициент пропорциональности.

Передаточную функцию процесса врезного шлифования, определяющую отношение изображения скорости съема припуска $V_{\text{п}}(p)$ к изображению скорости суппорта $V_{\text{с}}(p)$, с учетом упругих деформаций и износа круга можно представить в виде

$$V_{\text{п}}(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} V_{\text{с}}(p), \quad (14)$$

где k – коэффициент передачи; T_1 – постоянная времени, характеризующая изменение скорости износа шлифовального круга в зависимости от его диаметра; T_2 – постоянная времени процесса; ξ – безразмерный коэффициент.

Передаточная функция процесса может быть представлена в виде схемы в переменных состояния [3], как показано на рис. 4.

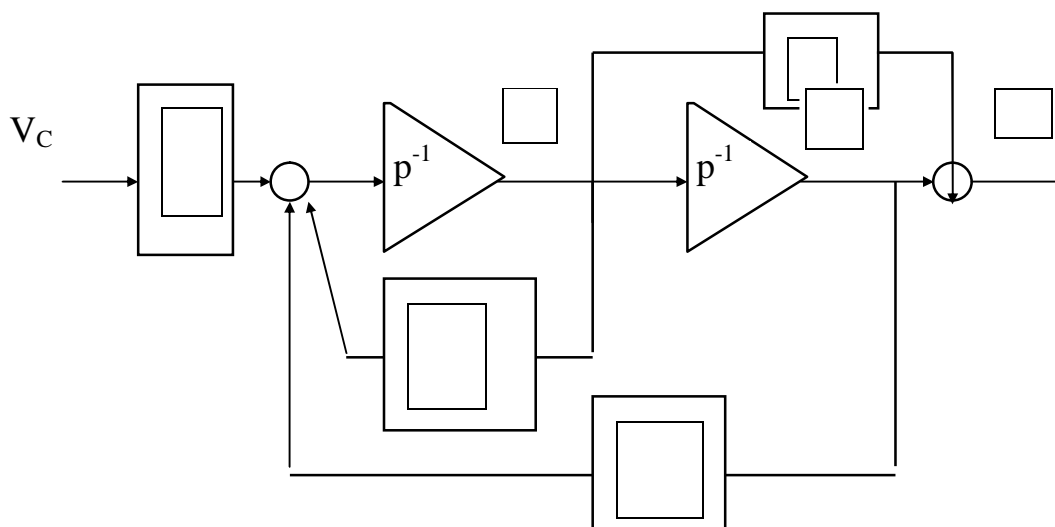


Рис. 4. Схема переменных состояния для процесса врезного шлифования

На основании схемы рис.4 математическая модель процесса запишется в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{cases} \frac{dV_D}{dt} = \frac{k}{T_2^2} V_C - \frac{2x}{T_2} V_D - \frac{1}{T_2^2} V_{II}^* \\ \frac{dV_{II}^*}{dt} = V_D \end{cases} \quad (15)$$

Скорость съема в данном случае определится суммой переменных состояния с учетом T_1

$$V_{II} = T_1 V_D + V_{II}^* \quad (16)$$

Задача определения вектора состояния сводится к операции перемножения переходной матрицы с вектором начальных условий [5].

Адекватность полученной модели реальному процессу во многом определится достоверностью значений коэффициентов и постоянных времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горанский Г.К. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ / Г.К. Горанский, Е.В. Владимиров, Л.Н. Лямбин. М.: Машиностроение, 1970. 224 с.
2. Корытин А.М. Автоматизация типовых технологических процессов и установок / А.М. Корытин, Н.К. Петров. М.: Энергоатомиздат, 1988. 432 с.
3. Ту Ю. Современная теория управления / Ю.Ту. М.: Машиностроение, 1971. 427 с.
4. Михелькевич В.Н. Автоматизация типовых технологических процессов и промышленных установок / В.Н. Михелькевич. Куйбышев: Куйбышев. политехн. ин-т, 1978. 59 с.
5. Демидов А.К. Моделирование электропривода методом пространства состояний / А.К. Демидов, А.Г. Александров, А.А. Губин // Проектирование и техническая диагностика автоматизированных комплексов: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1998. С. 105-110.

Демидов Александр Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Demidov Aleksandr Konstantinovich – Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of chair «Automation and control of technological processes» the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 20.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 537.528

Т.А. Ефремова, Р.Е. Куликов

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ЖИДКОСТИ. МОДЕЛЬ КОРОТКОГО ЦИЛИНДРА

Рассмотрена гидродинамическая задача электрического разряда в воде при вводе энергии в канал модели короткого цилиндра. Произведено полномасштабное математическое моделирование. Получены результаты по расчетам основных гидродинамических характеристик. Проведен анализ безразмерных графиков в сравнении со сферической моделью разряда.

Электрический разряд, жидкость, гидродинамические характеристики

Т.А. Efremova, R.E. Kulikov

CALCULATION OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE ELECTRIC CATEGORY IN THE LIQUID. MODEL OF THE SHORT CYLINDER

The hydrodynamic problem of the electric category in water is considered at energy input in the channel of model of the short cylinder. Full-scale mathematical modeling is made. Results by calculations of the basic hydrodynamic characteristics are received. The analysis of dimensionless schedules in comparison with spherical model of the category has been carried out.

Electric category, water, hydrodynamic characteristics

Рассмотрим электрический разряд в жидкости, длина разрядного промежутка которого велика по сравнению с характерным радиусом канала, но мала по сравнению с длиной волны, т. е. $R_0 \ll l \ll \lambda$.

Тот факт, что разрядный промежуток l велик по сравнению с характерным радиусом канала R_0 , позволяет считать, что в процессе разряда канал имеет вытянутую форму и может описываться однородной моделью короткого (по сравнению с длиной волны) цилиндра. При этом с акустической точки зрения такой разряд подобен точечному источнику звука, что дает основание называть такие разряды точечными.

Произведем расчеты искомых гидродинамических параметров.

Начальные условия из физических соображений естественно выбрать в виде [1]:

$$x = 0, y = y_0, \dot{y} = 0, z = y, \dot{z} = 0, \quad (1)$$

где x – безразмерная величина,

$$x = \frac{t}{\tau}, \quad (2)$$

где t – время процесса, с; τ – длительность разряда, с; y – безразмерная временная зависимость радиуса канала от времени,

$$y = \frac{R}{R_0}, \quad (3)$$

где R – радиус канала, м; R_0 – радиус канала в конце разряда, м.

Для расчета гидродинамических характеристик используются данные: разрядное напряжение $U = 2$ кВ; емкость разрядного контура $C = 4$ мкФ; индуктивность $L = 3$ мкГн; длина разрядного промежутка $l = 0.005$ м; плотность жидкости $\rho_0 = 1000$ кг/м³; скорость звука в воде $c_0 = 1410$ м/с; $\gamma = 0.912$. [1]

Рассчитаем радиус канала по формуле [1]

$$R = R_0 \cdot y, \quad (4)$$

$$R_0 = \left[\frac{(\gamma - 1)}{\pi \rho_0} \cdot \tau^2 \cdot \frac{E}{l} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где γ – некоторое эффективное значение показателя адиабаты, равное 1.26 в случае плазмы, образованной из воды;

$$\tau = \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}; \quad (6)$$

E – полная энергия, выделившаяся за время τ , Дж,

$$E \approx \frac{C \cdot U^2}{2}. \quad (7)$$

Найдем давление в канале [1]

$$(8)$$

$$P = \rho_0 \cdot \frac{R_0^2}{\tau^2} \cdot \xi_1(x),$$

где P – давление в канале, Па; $\xi_1(x)$ – функция, определяемая формулой:

$$\xi_1(x) = \frac{f(x)}{y^2} - \frac{z^2}{2y^2}, \quad (9)$$

$f(x)$ – функция, описывающая режим выделения энергии,

$$f(x) = \frac{E(t)}{E}, \quad (10)$$

$E(t)$ – функция, выражающая зависимость энергии, выделяющейся в канале, от времени,

$$E(t) = \int_0^t I \cdot U dt, \quad (11)$$

где I – сила тока, А; z – дополнительная функция, такая, что справедливо следующее уравнение [1]:

$$\frac{d(y\dot{y})}{dx} = \frac{f(x)}{y^2 \cdot \ln \frac{1}{R_0 \cdot y}}. \quad (12)$$

Уравнение (12) для удобства численных расчетов удобно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dz}{dx} = \frac{f(x)}{y^2 \cdot \ln \frac{1}{R_0 \cdot y}}, \\ \frac{dy}{dx} = \frac{z}{y}. \end{cases} \quad (13)$$

Решая систему (13) с учетом начальных условий, получим, что $z=0+0.858$ [1].

Следует учесть, что функция $f(x)$ может быть известна, например, из эксперимента.

Запишем общий вид функции $f(x)$:

$$f(x) := \begin{cases} (2 \cdot x^2) & \text{if } 0 \leq x \leq \frac{1}{2} \\ 4x - 2x^2 - 1 & \text{if } \frac{1}{2} \leq x \leq 1 \\ 1 & \text{if } 1 \leq x \end{cases} \quad (14)$$

Рассчитаем давление в излучаемой волне сжатия [1]:

$$p = \rho_0 \cdot \frac{R_0^2}{\tau^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot r} \cdot \frac{f(x)}{y^2 \cdot \ln \left(\frac{1}{R_0 \cdot y} \right)}, \quad (15)$$

где p – давление в излучаемой волне сжатия, Па; r – радиальная координата, м,

$$r = c_0 \cdot t. \quad (16)$$

Рассчитаем работу, совершаемую каналом при расширении [1]:

$$A = l \cdot \rho_0 \cdot \pi \cdot \frac{R_0^4}{\tau^2} \cdot z^2 \cdot \ln \left(\frac{1}{R} \right), \quad (17)$$

где A – работа, совершаемая каналом при расширении, Дж.

Вычислим внутреннюю энергию плазмы в канале [1]:

$$W = \frac{1}{\gamma - 1} \cdot \rho_0 \cdot \frac{\pi \cdot R_0^4 \cdot l}{\tau^2} \cdot \left(f(x) - \frac{z^2}{2} \right) \quad (18)$$

где W – внутренняя энергия плазмы в канале, Дж.

Найдем излучаемую акустическую энергию [1]:

$$W_{\text{ак}} = \pi \cdot \rho_0 \cdot \frac{l^2 \cdot R_0^4}{c_0 \cdot \tau^3} \cdot \left(J_1 + \frac{1}{12} \cdot \frac{l^2}{c_0^2 \cdot \tau^2} \cdot J_2 \right), \quad (19)$$

где $W_{\text{ак}}$ – излучаемая акустическая энергия, Дж; J_1, J_2 – численные значения интегралов,

$$J_1 = \int_0^1 \left(\frac{f(x)}{y^2 \cdot \ln\left(\frac{1}{R_0 \cdot y}\right)} \right)^2 dx, \quad (20)$$

$$J_2 = \int_0^1 \left(\frac{d}{dx} \frac{f(x)}{y^2 \cdot \ln\left(\frac{1}{R_0 \cdot y}\right)} \right)^2 dx \quad (21)$$

Электроакустический КПД. – отношение акустической энергии, излученной во время разряда, к полной энергии, введенной в канал [1]:

$$\eta = \frac{W_{\text{ак}}}{E}. \quad (22)$$

Все результаты сведем в таблицу.

Результаты расчета гидродинамических характеристик

Рассчитываемая характеристика	Численное значение
Радиус канала	$1.815 \cdot 10^{-3}$ (м)
Характерный радиус канала	$1.99 \cdot 10^{-3}$ (м)
Давление в канале	$2.54 \cdot 10^7$ (Па)
Давление в излучаемой волне сжатия	$6.463 \cdot 10^6$ (Па)
Работа канала при расширении	1.552 (Дж)
Внутренняя энергия плазмы в канале	5.055 (Дж)
Излучаемая акустическая энергия	0.954 (Дж)
Электроакустический RGL	11.9 %

Произведем математическое моделирование канала короткого цилиндра.

В таблице даны значения функций, необходимых для расчета гидродинамических характеристик. Эти функции представляют собой в безразмерном виде следующие временные зависимости:

- радиуса канала $y(x)$;
- давления в импульсе сжатия:

$$g = \frac{f(x)}{y^2 \cdot \ln\left(\frac{1}{R_0 \cdot y}\right)}; \quad (23)$$

- давления в канале:

$$\xi_1 = \frac{f(x)}{y^2} - \frac{z^2}{2y^2}. \quad (24)$$

Следует учесть, что функция $y(x)$ входит в правую часть равенства (4), функция g – в правую часть соотношения (15), а функция ξ является частью выражения (8).

Построим временные зависимости радиуса канала, давления в импульсе сжатия и давления в канале модели короткого цилиндра в программе Mathcad 14 (рис. 1-3).

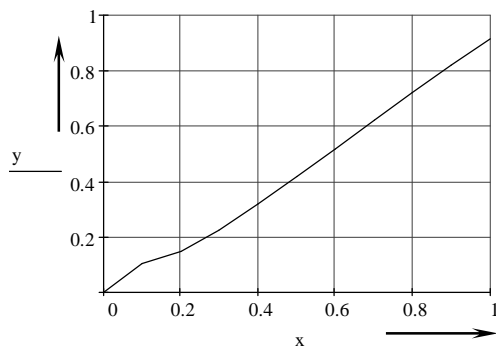


Рис. 1. Безразмерный радиус канала в функции времени

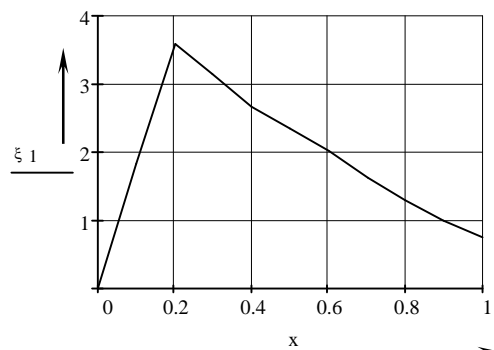


Рис. 2. Безразмерное давление в канале в функции времени

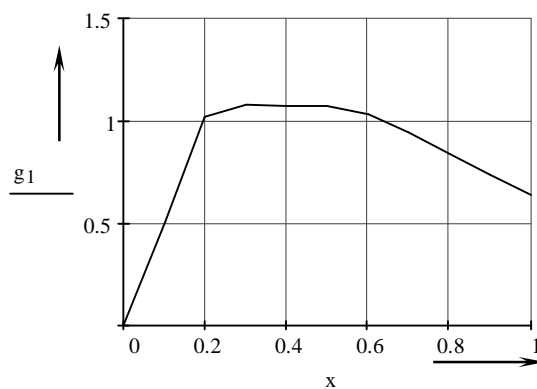


Рис. 3. Безразмерный профиль давления в излучаемой каналом волне сжатия

Полученные результаты позволяют утверждать, что числовое значение давления в канале приблизительно в четыре раза превосходит давление в излучаемой волне сжатия – это соответствует физическому смыслу.

Исходя из того, что радиус канала зависит от y , который в процессе разряда с течением времени возрастает, можно заключить следующее: радиус канала со временем увеличивается, а характерный радиус канала, имеющий место быть в конце разряда, равен $R_0 = 1.99 \cdot 10^{-3}$ (м) и характеризует при проведении различных технологических процессов с использованием электрогидравлических взрывов наибольшее расчетное расстояние между электродами и конечными объектами приложения данных воздействий. По сравнению со сферической моделью разряда значение R_0 в данном случае получилось несколько меньшим ($2.259 \cdot 10^{-3}$ (м)) [2].

Найденное нами значение электроакустического КПД полностью совпало с оценочным своим значением, то есть $\eta = 11.9\%$, что соответствует теоретическому $\eta \sim 10\%$ для наиболее востребованных на практике разрядов умеренной интенсивности. Сравнительно со сферическим каналом [2] КПД получился немного большим (11.5%). Сравнительно со сферическим каналом КПД получился немного большим (11.5%). Это обусловлено тем, что значение излучаемой акустической энергии также несколько превосходит (0.954 (Дж)) аналогичное значение сферической модели (0.919 (Дж)).

Построенная временная зависимость радиуса канала в безразмерном виде (рис.1) показывает, что $y(x)$ при $x=1$, то есть при $t=\tau$, близка к значению 0.912 при аппроксимации функции $f(x)$. Следовательно, с точностью до этого коэффициента радиус канала к концу разряда равен R по формуле $R = R_0 \cdot y$.

Результаты анализа безразмерного давления в функции времени (рис.2) позволяют утверждать, что наибольший интерес представляет «поведение» давления при значениях аргумента $x < 0.4$. Максимальное значение безразмерной функции, определяющей давление в канале, приблизительно равно 3.6, то есть является довольно значительным, и давление составляет $2.54 \cdot 10^7$ (Па), что на два порядка превосходит нормальное атмосферное давление и в 2.5 раза больше аналогичного значения при расчете сферической модели [2] ($1.066 \cdot 10^7$ (Па)).

Функция g_1 (рис.3) при данном выборе аппроксимации в своем максимуме приблизительно равна 1.1. Таким образом, максимальное давление в импульсе сжатия составляет $6.463 \cdot 10^6$ [Па], что больше подобного значения при использовании сферического канала [2] ($5.241 \cdot 10^6$ (Па)).

ЛИТЕРАТУРА

1. Наугольных К. А. Электрические разряды в воде / К. А. Наугольных, Н. А. Рой. М.: Наука, 1971. 155 с.
2. Куликов Р.Е. Расчет гидродинамических характеристик электрического разряда при вводе энергии в сферический канал / Р.Е. Куликов, Т.А. Ефремова // Информационные технологии систем автоматизированного проектирования и автоматизации: сб. науч. тр. 2 Всерос. науч.-техн. конф., посв. 80-летию СГТУ. Саратов, 2010. С. 184-186.
3. Юткин Л. А. Электродинамический эффект и его применение в промышленности / Л.А. Юткин. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
4. О возможности электродинамической регенерации очистных полимерных фильтров / А.М. Артемьев, И.В. Вовк, А.И. Кривоног, П.В. Лукьянов // Акуст. вест. 2005. Т. 8, №4. С. 14-19.
5. Вовченко А.И. Гидродинамические характеристики электрического разряда в жидкости при вводе энергии в канал в виде повторяющихся импульсов / А.И. Вовченко, В.Г. Ковалев, В.А. Поздеев // Акуст. вест. 2002. Т. 5. № 3. С. 12-18.
6. Еремин В.Я. О начальной стадии развития электрического разряда в жидкости / В.Я. Еремин, А.В. Еремин, К.Д. Молчанов // Электротехника 2003: 9 Симпозиум. М., 2007. Доклад 7.15.
7. Ковальчук В. В. Внутренняя энергия и давление плазмы в канале электрического разряда / В.В. Ковальчук, О.И. Лещенко, О.В. Осипенко // Труды Одесского политехнического университета. 2008. Вып. 2 (30). С. 228-234.

Ефремова Татьяна Александровна – доцент кафедры «Управление и информатика в технических системах» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Efremova Tatyana Aleksandrovna – the senior lecturer of chair «Management and Information Science in Technical Systems» of Balakovo Institute of Techniques, Technology and Management of Saratov State Technical University

Куликов Роман Евгеньевич – студент группы УИТ-52 Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Kulikov Roman Evgenyevich – student groups UIT-52 of Balakovo Institute of Techniques, Technology and Management of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 23.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 681.5

С.А. Игнатъев, А.А. Шабалина**СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САПР T-FLEX**

Рассматривается система мониторинга технологического процесса с использованием системы автоматического проектирования T-Flex для оценки динамического состояния оборудования и оперативной корректировки ТП.

Технологический процесс, мониторинг, система автоматизированного проектирования

S.A. Ignatyev, A.A. Shabalina**SYSTEM OF MONITORING OF TECHNOLOGICAL PROCESS
WITH USE OF SYSTEM OF AUTOMATIC DESIGNING T-FLEX**

The system of monitoring of technological process with use of system of automatic designing T-Flex for an estimation of a dynamic condition of the equipment and operative updating of technological process is considered.

Technological process, monitoring, system of automatic designing

В условиях производства при решении вопросов планирования необходимо оперативно решать ряд взаимосвязанных технических и технологических задач, связанных с оценкой технического состояния прецизионного оборудования, автоматизацией измерений, обработки и формирования корректирующих воздействий в систему планирования технологического процесса (ТП) в рамках автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) [1].

Вопросы планирования рассматривали такие ученые как С.П. Митрофанов, Ю.М. Соломенцев, Б.М. Базров, И.П. Норенков и другие. В СГТУ Бочкаревым П.Ю. разработана система планирования ТП, которая представляет собой многоуровневую иерархическую систему [2]. Однако, несмотря на полученные результаты, в используемых в настоящее время принципах и методах технологического проектирования не в полной мере учитываются их достижения в многономенклатурных производственных системах механообработки. Совершенствование методов создания технологии, ориентированных на возможность глубокой формализации проектных действий, обеспечивающих разработку ТП в условиях конструктивного и технологического многообразия деталей, предполагает формирование корректирующего воздействия с учетом данных о техническом состоянии технологического оборудования [1].

Для организации мониторинга ТП производства подшипников потребовались разработка и внедрение новых автоматизированных технических средств – виброизмерительного комплекса и приборов вихретокового контроля [3]. Однако помимо аппаратного, метрологического, информационного обеспечения мониторинга ТП, немаловажным является и методическое обеспечение.

Методическое обеспечение системы мониторинга ТП (СМТП) и системы планирования ТП, представленное на рисунке, подразделяется на четыре блока. Основу структуры системы мониторинга шлифовального оборудования и ТП обработки колец подшипников составляет группа контрольно-измерительных операций – автоматизированный контроль динамического состояния каждого станка до и в процессе обработки по уровню вибраций

шпиндельных узлов (ШУ), автоматизированный контроль однородности структуры поверхностного слоя дорожек качения колец вихретоковым методом, измерение волнистости, отклонения от круглости дорожек качения.

Заданная точность размеров обеспечивается применением средств активного контроля [4, 5]. Кроме того, с помощью прибора активного контроля, имеется возможность автоматически контролировать динамическое состояние станка путем анализа вибраций жесткой опоры детали с помощью встроенного датчика [6, 7].

Реализуя принцип обратной связи, активный контроль выражает общую тенденцию, отражающую приложении современных методов теории управления к автоматизированному технологическому оборудованию. Формируемая измерительными преобразователями информация о величине и направлении изменения размеров, позволяет оптимизировать технологический режим и обеспечить заданный уровень качества обработки

Разработанная система планирования в работе Нестеровой И.В. предназначена для локального использования и разработана с использованием ограниченной по своему функционалу базы данных. Программное обеспечение T-Flex имеет единую базу данных разработанную на основе SQL Server.

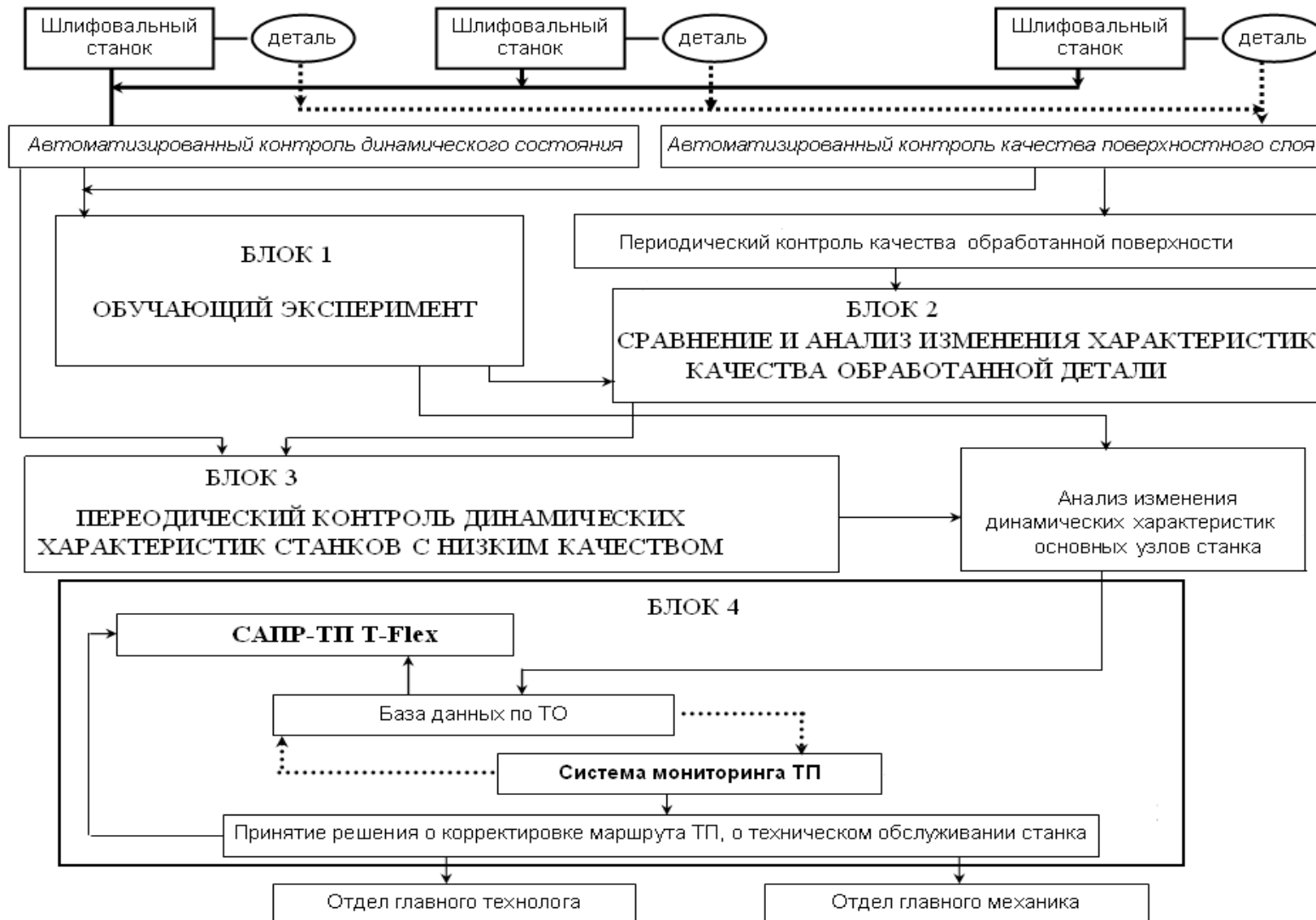
Разработанная система оценки позволяет в автоматизированном режиме характеризовать возможность станка обеспечить заданные параметры качества поверхности и является определяющим моментом в формировании корректирующего воздействия в базу знаний системы планирования для дальнейшей корректировки маршрута ТП [8]. Оценка качества поверхностного слоя производится по вихретоковому образу в виде разверток сканируемых поверхностей, на которых яркостью и цветом выделяются локальные и периодические неоднородности поверхностного слоя детали. Значения оценки по каждой группе оборудования хранятся в базе данных по технологическому оборудованию (БДТО).

Сравнение и анализ изменения характеристик качества обработки деталей, полученных при периодическом контроле качества обработанной поверхности, полученной с помощью обучающего эксперимента, позволяет выявить станки, не обеспечивающие требуемое качество обработки (блок 2).

Далее проводится периодический контроль динамических характеристик станков с низким качеством обработки (блок 3) с помощью разработанного метода автоматизированной оценки динамического состояния шлифовальных станков. Принципиально возможны два подхода для контроля динамического состояния станков по ВА колебаниям. Первый подход базируется на периодическом контроле выбранного информационного параметра и сравнении его значения с пороговым, полученным на стадии обучающего эксперимента. Этот способ рекомендуется использовать для однотипных станков. Второй подход заключается в постоянном контроле изменений значений выбранного информационного параметра, характеризующего изменение динамического состояния станка и его узлов. Использование второго подхода предполагает оснащение системы активного контроля встроенными вибродатчиками и позволяет регистрировать и накапливать результаты измерений в СМТП.

Использование метода автоматизированной оценки динамических характеристик станка по ВА колебаниям в комплексе с автоматизированным вихретоковым контролем неоднородности поверхностного слоя шлифованных деталей не просто увеличивает объем информации о ТП, но и позволяет повысить эффективность управления шлифованием за счет корректировки базы знаний системы планирования [9].

Результаты сравнения и анализа изменения динамических характеристик, полученных при периодическом контроле в выбранных точках сохраняются в базе данных T-Flex по технологическому оборудованию (БДТО). Систематизация накопленных результатов системы мониторинга дает возможность оценивать реальное динамическое состояние станков и давать рекомендации для ремонта по текущему состоянию станков, а также корректировать маршрут обработки в САПР ТП путем обновления данных базы знаний системы планирования (блок 4).



Методическое обеспечение системы мониторинга технологического процесса с использованием T-Flex

Решение задач технологической подготовки производства немислимо без организации единого информационного пространства предприятия. Это необходимо для того, чтобы все инструменты технологического проектирования могли уверенно опираться на всю необходимую справочную информацию и реальные данные, полученные в результате конструкторского проектирования. Полностью обновлённая система T-FLEX Технология 2010 является одним из компонентов комплекса TFLEX 2010 и в любой момент располагает всей необходимой информацией. Такая архитектурная организация позволяет использовать в технологическом модуле часть необходимой технологам функциональности PDM, а также организовать единое информационно-справочное пространство для технологов и конструкторов [10].

Система T-FLEX Технология 2010 обеспечивает возможность создания и параметризации типовых технологических процессов при их использовании на предприятии. В таких параметрических технологических процессах могут автоматически пересчитываться значения параметров по всему технологическому процессу и производиться автоматический подбор оснащения.

Существенному улучшению подверглись почти все компоненты системы T-FLEX Технология 2010, но следует отметить новый API (*application programming interfaces* – интерфейс прикладного программирования) системы, опирающийся на мощнейшее ядро новой информационной платформы T-FLEX DocsLine. В результате пользователи T-FLEX Технология 2010 получили в своё распоряжение большой потенциал как для построения своих собственных систем, так и для модернизации логики любых внутренних алгоритмов работы системы. API для работы с технологическими данными теперь полностью объединён с функциями доступа к составам изделий, номенклатурной и справочной информации [10].

Использование метода автоматизированной оценки динамического состояния шлифовального станка по уровню ВА колебаний, автоматически снимаемых в информативных точках контроля, позволяет связать качество обработки с уровнем вибрации основных формообразующих узлов станка для принятия решения о его дальнейшем использовании в ТП, что обеспечивает максимальную загрузку оборудования в соответствии с его техническим состоянием, и соответственно снижает число бракованных деталей.

Интеграция САПР и АСУ ТП требует глубокой перестройки всей организации, пересмотра взаимоотношений между отдельными обслуживающими подразделениями, кардинального совершенствования управления материальными и информационными потоками, а также переподготовки инженерно-технического персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатъев С.А. Методическое обеспечение автоматизированной оценки динамического состояния шлифовальных станков в системе мониторинга для корректировки технологического процесса / С.А. Игнатъев, И.В. Нестерова, А.А. Игнатъев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 1 (11). Вып. 2. С. 90-97.
2. Бочкарев П.Ю. Проектирование маршрутов многономенклатурных технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарев. Саратов: СГТУ, 1996. 32 с.
3. Автоматизированная система вихретокового контроля деталей подшипников / А.А. Игнатъев, В.В. Горбунов, С.И. Зайцев, С.А. Игнатъев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2005. № 2 (7). С. 114-122.
4. Активный контроль размеров / под. ред. С.С.Волосова. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
5. Горбунов В.В. Совершенствование технологии шлифования колец подшипников активным контролем комплекса параметров нестационарных режимов обработки: автореф. дис....канд. техн. наук / В.В. Горбунов. Саратов: СГТУ, 1999. 16 с.

6. Игнатъев А.А. Мониторинг технологического процесса на основании автоматизированного контроля динамических характеристик станков / А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, С.А. Игнатъев // СТИН. 2005. № 7. С. 3-7.

7. Васин М.П. Повышение стабильности параметров точности шлифовальных поверхностей качения колец подшипников на основе многопараметрового активного контроля: автореф. дис...канд. техн. наук / М.П. Васин. Саратов, 2007. 16 с.

8. Нестерова И.В. Корректировка технологического маршрута с учетом технического состояния станков / И.В. Нестерова, С.А. Игнатъев // Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении: тр. Всерос. конф. Тольятти: ТГУ, 2005. С. 296-298.

9. Мониторинг станков и процессов шлифования в подшипниковом производстве / А.А. Игнатъев, М.В. Виноградов, В.В. Горбунов и др. Саратов: СГТУ, 2004. 124 с.

10. <http://www.tfex.ru/>

Игнатъев Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Ignatyev Stanislav Aleksandrovich – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of «Automation and management of technological processes» of Saratov State Technical University

Шабалина Анна Александровна – аспирантка кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Shabalina Anna Aleksandrovna – Post-graduate Student of the Department of «Automation and management of technological processes» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 11.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 681.5

С.А. Игнатъев, А.А. Шабалина

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

Рассматриваются характеристики систем автоматического проектирования с учетом специфики российских предприятий и возможность управлять качеством продукции.

Управление качеством продукции, мониторинг, система автоматизированного проектирования

S.A. Ignatyev, A.A. Shabalina

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF SYSTEMS OF AUTOMATIC DESIGNING FOR PRODUCT QUALITY CONTROL

Characteristics of systems of automatic designing taking into account specificity of the Russian enterprises and possibility to operate quality of production are considered.

Product quality control monitoring, system of automatic designing

Качество продукции (включая новизну, технический уровень, отсутствие дефектов при исполнении, надежность в эксплуатации) является одним из важнейших средств конкурентной борьбы, завоевания и удержания позиций на рынке. В связи с этим особое внимание уделяется обеспечению высокого качества продукции, устанавливая контроль на всех стадиях производственного процесса, начиная с контроля качества используемых сырья и материалов и заканчивая определением соответствия выпущенного продукта техническим характеристикам и параметрам не только в ходе его испытаний, но и в эксплуатации, а для сложных видов оборудования – с предоставлением определенного гарантийного срока после установки оборудования на предприятии заказчика. Управление качеством продукции стало основной частью производственного процесса и направлено не столько на выявление дефектов или брака в готовой продукции, сколько на проверку качества изделия в процессе его изготовления и предотвращения брака [1, 2].

На многих предприятиях различных стран успешно функционируют системы управления качеством выпускаемой продукции, такие как SQC (Statistical Quality Control), TQC (Total Quality Management), ISO 9000 и PI (Product Innovation) и ряд других [3]. Тем не менее, в выпускаемой продукции наблюдаются вариации качества деталей и повторяющиеся случаи дефектов одного рода, высокие издержки на поддержку качества, недостаточная надежность и сложность оборудования.

Качество продукции машиностроения, в том числе в подшипниковом производстве, определяется качеством технологического процесса (ТП), который должен обладать высокой степенью надежности и гарантированно обеспечивать параметры изготавливаемых изделий. Наиболее важной составной частью ТП являются автоматизированные металлорежущие станки (МРС), технический уровень которых определяет возможности предприятия по выпуску конкурентоспособной продукции и эффективность производства [4].

Одним из способов управления качеством шлифования является мониторинг ТП. В подшипниковой промышленности используется новый метод статистического управления процессами – мониторинг технологических процессов шлифования. Понятие мониторинга, сформулированное А.В. Пушем, включает диагностику, идентификацию, прогнозирование и управление состоянием станочной системы на основе анализа информации, а также принятие решения о корректировке [5]. Мониторинг процесса шлифования направлен на обеспечение качества деталей технологическими средствами, когда результаты измерений определяющих параметров способствуют предупреждению появления брака вместо его фиксирования. Одной из актуальных задач является разработка метода автоматизированной оценки технического состояния шлифовального оборудования по виброакустическим колебаниям, а также корректировка на основе полученных данных маршрута ТП колец подшипников в системе механообработки [6, 7].

Одним из решающих направлений совершенствования технологического процесса производства (ТПП) является создание и эффективное использование автоматизированных систем, основанных на широком использовании ЭВМ.

При неавтоматизированной подготовке производства ТП разрабатываются непосредственно в виде комплектов технологической документации. При использовании автоматизированных систем ТПП создаваемые описания ТП размещаются в компьютерной базе данных, а соответствующая документация является лишь отображением внутреннего представления ТП во внешнюю сферу. Хранящиеся в базе данных ТП являются основным источником информации для решения задач автоматизированного управления технологической подготов-

кой производства. При этом разработка ТП выполняется с помощью специальных систем автоматизированного проектирования ТП (САПР ТП).

Автоматизированная система технологической подготовки производства (АСТПП) является подсистемой АСУП (автоматизированной системы управления предприятием) и состоит из функциональных подсистем более низкого уровня, выделенных в соответствии с задачами, решаемыми в процессе ТПП: системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПРТП), системы автоматизированного проектирования технологического оснащения (САПРТО), системы автоматизированного проектирования производственных подразделений (САПРОП) и системы управления технологической подготовки производства (АСУТПП) [8].

Многokратное увеличение функциональных возможностей вычислительных систем открыло путь для использования новых схем сопряжения систем автоматизированного проектирования (САД) и автоматизированного производства (САМ) [9, 10].

С помощью САПР можно воздействовать на станок изменяя условия ТП изготавливаемого изделия.

САПР для конструирования могут применяться различные программы, например: T-Flex, СПРУТ-ТП, Гемма-3D, Аппиус 1С Технология и др. Особое внимание уделим программному комплексу T-Flex.

В таблице приведена сравнительная характеристика T-Flex и других распространенных САПР ТП, используемых в традиционном производстве.

Если адаптация САПР конструкции изделия зарубежной разработки к отечественным условиям применения и ее «русификации» проходят сравнительно просто, то аналогичные действия с САПР ТП часто вызывают серьезные затруднения. Прежде всего сказываются различия в нормативных базах (отечественные стандарты не совпадают с зарубежными). Не совпадают марки используемых материалов, разнятся методики определения и характеристик, не совпадает общая методология проектирования ТП, подходы к определению режимов обработки, оценки возможных сил резания и т.д. Все это накладывает серьезные ограничения на конкурентоспособность САПР ТП зарубежной разработки на отечественном рынке [14].

На некоторых отечественных предприятиях уже начали применять «связки» САПР зарубежной и отечественной разработки. Автоматизированное конструирование изделий и его элементов выполняют с помощью зарубежной САПР конструирования изделия, а технологическую подготовку – с помощью отечественной САПР ТП. При интеграции систем становятся первоочередными проблемы совместимости форматов экспортируемых (импортируемых) данных [14].

Программный комплекс T-Flex Технология имеет два существенных отличия от других рассматриваемых САПР. Во-первых, использование международных лицензионных продуктов международного стандарта. Во-вторых, имеется возможность расширения комплекса с применением языков программирования высокого уровня. Языки программирования С и С++ относятся к числу наиболее мощных, гибких и наиболее распространенных языков программирования высокого уровня.

Создание единого информационного пространства для управления процессами разработки и подготовки производства выводит предприятие на качественно новый уровень организации работ и существенно упрощает прохождение сертификации по стандарту системы качества ГОСТ ИСО 9001 – аналога ISO 9001, признанного мировым сообществом в качестве эталона современной модели эффективного менеджмента [15].

Внедрение САПР требует создания соответствующей системы организации работ, только в этом случае может быть обеспечено эффективное использование сложной и высокопроизводительной техники

Сравнительная характеристика САПР ТП

	T-Flex Технология	СПРУТ-ТП	ГеММа-3D	Аппиус 1С Технология
Наличие других взаимосвязанных модулей	Имеются	Имеются	Имеются	Имеются В основном предназначены для бухгалтерского учета
Единство данных и автоматизированное отслеживание изменений по всему проекту	Обеспечивает	Обеспечивает	Обеспечивает	Обеспечивает
Учитывают российскую специфику в соответствии с ГОСТом	Да	Да	Да	Да
Использование лицензионных продуктов международного стандарта	Используются: - Лицензионное геометрическое ядро Parasolid фирмы Siemens PLM Software; - Известная библиотека DWGDirect; - Microsoft SQL-server корпорации Microsoft; - Лицензированный генератор конечно-элементных сеток компании Simmetrix	Не используют	Не используют	Базируется на единой технологической платформе «1С:Предприятие 8», которая, в свою очередь, базируется на сервере управления базами данных Microsoft SQL-Сервер

Окончание таблицы

	T-Flex Технология	СПРУТ-ТП	ГеММа-3D	Аппиус 1С Технология
Интеграция	Можно выделить межсистемную интеграцию внутри комплекса и интеграцию со сторонними системами автоматизации проектирования, используемыми пользователями. В комплексе T-FLEX CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM системы автоматизации проектирования и PDM-система работают совместно сразу после установки	Для оформления эскизов СПРУТ-ТП интегрирована с SolidWorks (*.slddrw), AutoCAD (*.dwg, *.dxf), Компас (*.cdw, *.frw) и др. системами по стандартным форматам обмена (*.dxf, *.emf, *.wmf, *.jpg, *.bmp). Интеграция с использованием схемы преобразования (трансформации). Схема преобразования представлена в виде XML-файла. Сложно адаптируется	Возможна передача данных в виде как 3D-моделей, так и чертежей из всех известных CAD-систем, с помощью чего и осуществляется интеграция [11]	Возможна практически с любыми внешними программами и оборудованием на основе общепризнанных открытых стандартов и протоколов передачи данных [12]
Единая база данных	Да	Собственная БД, объединенная из различных составных блоков	Да	Да
Возможность расширения комплекса	Имеется. Позволяют использовать любые языки программирования (C++, Visual Basic, C#, ...)	Имеется. На платформе языка СПРУТ	Имеется Собственный язык программирования GML - GeMМа Macro Language, предназначенный для создания макропроцедур [13]	Имеется. Собственный язык программирования 1С: Предприятие
Возможность доработки	Предусмотрена	Предусмотрена	Предусмотрена	Предусмотрена

ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатъев С.А. Обеспечение качества формообразования деталей точного машиностроения на основе мониторинга технологического процесса и оборудования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С.А.Игнатъев. Саратов, 2009. 36 с.
2. Серова А.А. Автоматизация технологической подготовки производства / А.А.Серова // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2009. С. 84-88.
3. Всеобщее управление качеством / О.П. Глудкин, Н.М. Горбунов, А.И. Гуров, Ю.В. Зорин. М.: Радио и связь, 1999. 600 с.
4. Игнатъев А.А. Совершенствование системы управления качеством продукции на основе системы мониторинга технологического процесса / А.А. Игнатъев, В.В. Горбунов, С.А. Игнатъев // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2005. С. 81-87.
5. Пуш А.В. Моделирование и мониторинг станков и станочных систем / А.В. Пуш // СТИН. 2000. № 9. С. 12-20.
6. Бочкарев П.Ю. Автоматизированный выбор технологического оборудования в АСУТП при шлифовании деталей / П.Ю. Бочкарев, И.В. Нестерова // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-18: сб. тр. XVIII Междунар. науч. конф. Казань: Казан. гос. ун-т, 2005. С. 62-65.
7. Игнатъев С.А. Методическое обеспечение автоматизированной оценки динамического состояния шлифовальных станков в системе мониторинга для корректировки технологического процесса / С.А.Игнатъев, И.В.Нестерова, А.А.Игнатъев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 1 (11). Выпуск 2. С. 90-97.
8. Дмитриевский Б.С. Автоматизированные информационные системы управления инновационным наукоемким предприятием / Б.С. Дмитриевский. М.: Машиностроение – 1, 2006. 156 с.
9. Сайт журнала СТА (современные технологии автоматизации) <http://www.cta.ru/>
10. Журнал «Chip News» - научно-технический журнал <http://chipnews.com.ua/>
11. <http://www.gemma.ru/pub.php?ObjectID=892&CatID=1>
12. http://www.appius.ru/index.php?form=index&href=ind_1c
13. <http://www.gemma.ru/pub.php?ObjectID=521&CatID=1>
14. Кондаков А.И. САПР технологических процессов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / А.И. Кондаков. 2-е изд., стер. М.: Изд. центр «Академия», 2008. 272с.
15. <http://www.tfex.ru/products/>

Игнатъев Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Ignatyev Stanislav Aleksandrovich – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of «Automation and management of technological processes» of Saratov State Technical University

Шабалина Анна Александровна – аспирантка кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Shabalina Anna Aleksandrovna – Post-graduate Student of the Department of «Automation and management of technological processes» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 11.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

Т.Д. Козлова, А.А. Игнатьев, Е.М. Самойлова

РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Описывается реализация экспертной системы поддержки принятия решений для определения причин неисправностей технологических систем, которая производит выдачу рекомендаций по способам устранения возникших неисправностей автоматизированного станочного модуля.

Экспертная система, база знаний, автоматизированный станочный модуль, предметная область, производственная модель, база данных

T.D. Kozlova, A.A. Ignatyev, E.M. Samoilova

IMPLEMENTATION OF EXPERT DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEMS FOR DETECTING IRREGULARITIES TECHNOLOGICAL SYSTEM

The article describes the implementation of expert decision-making support systems to identify the reasons of malfunctions of technological systems, which makes extradition conditional recommendations on ways of correcting any faults automated machine module.

Expert system, knowledge base, an automated machine module, subject area, model of products, a database

Экспертные системы составляют одно из наиболее перспективных направлений в области искусственного интеллекта. Под экспертной системой (ЭС) понимается система, объединяющая возможности компьютера со знаниями и опытом эксперта в такой форме, что система может предположить разумный совет или осуществить разумное решение поставленной задачи [1]. ЭС также должна пояснить ход своих рассуждений в понятной форме.

В отличие от систем математического моделирования ЭС моделирует не столько физическую (или иную) природу определенной проблемной области, сколько механизм мышления человека применительно к решению задач в этой проблемной области. Система производит не только вычислительные операции, но и формирует определенные соображения и выводы, при формировании которых система основывается на знаниях, которыми она располагает. Эти знания называют базой знаний ЭС [2].

Области применения систем, основанных на знаниях, разнообразны. Они могут быть использованы в: сфере образования, промышленности, экономической сфере, сфере здравоохранения и т.д. Обзор существующих экспертных систем позволил сгруппировать их в следующие классы: системы диагностики (например, медицинская диагностика, диагностика неисправностей в механических и электрических устройствах и другие), системы контроля и управления, прогнозирующие системы, системы мониторинга, обучающие системы, системы поддержки принятия решений [2, 4].

Большую популярность ЭС получили в области машиностроения. Интеллектуальные технологии в данной области используются для создания систем мониторинга, диагностики и систем поддержки принятия решений. Примером применения экспертных систем в машиностроении может служить ЭС, используемая на токарных станках. Данная система производит построение виртуальной детали и определяет ее показатели точности, осуществляет

анализ входной априорной информации и сравнение рассчитанных показателей точности с информацией с чертежа и приводятся причины превышения допусков и рекомендации по их улучшению [3].

Разрабатываемая экспертная система поддержки принятия решений предназначена для определения причин неисправностей автоматизированного станочного модуля (АСМ) ТПАРМ-100. Она не предназначена для замены человека, принимающего решения. Поэтому данная система не включается в контур управления [4] (рис. 1).

При проектировании такой системы необходимо выполнить следующие требования:

1. Система должна быть эффективной, она должна давать достоверные рекомендации по устранению неисправностей.
2. Интерфейс данной системы должен быть понятен для пользователей с различным уровнем способностей.
3. База знаний системы должна периодически обновляться для повышения эффективности работы.

При возникновении неисправности пользователь обращается к системе, система обрабатывает запрос пользователя, далее система производит опрос пользователя в режиме диалога. После опроса ЭС выдает пользователю рекомендации по способу устранения возникшей неисправности. База знаний (БЗ) и база данных (БД) системы построены на основе экспериментальных данных отказов АСМ. БЗ системы содержит в своей структуре неисправности АСМ и способы их устранения, она также может обращаться к БД отказов, структура которой представлена виде ER-диаграммы на рис. 2. ER-диаграмма предназначена для наглядного описания модели создаваемой БД. Создание ER-диаграммы лежит в основе современных подходов проектирования БД.

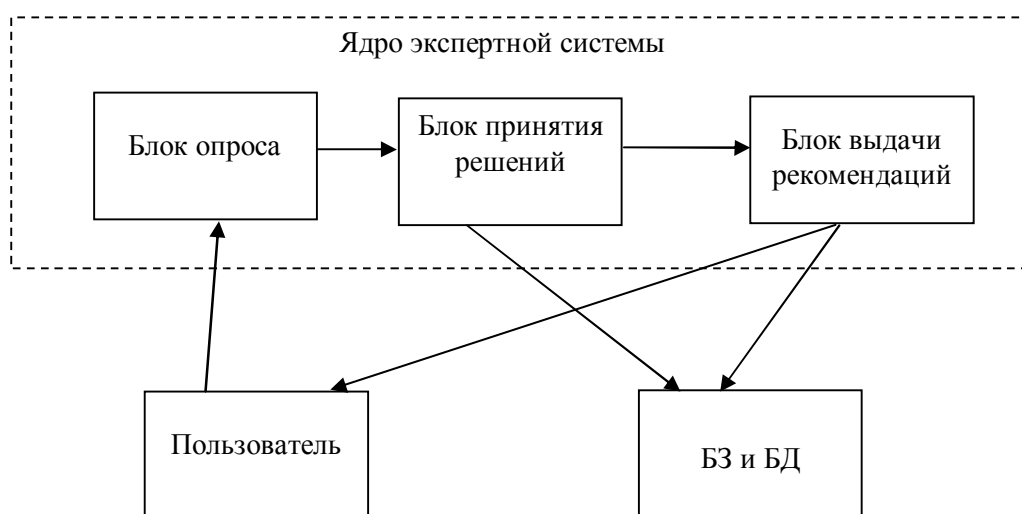


Рис. 1. Структура экспертной системы поддержки принятия решений

БД отказов разработана с целью упрощения обновления базы знаний ЭС. Использование внешней БД позволяет пользователю обновлять неисправности и способы их устранения без внесения изменений в базу знаний. При добавлении новых неисправностей АСМ и способов их устранения пользователю нет необходимости обращаться за помощью к программисту. БД отказов реализована в СУБД Microsoft Access 2007. Для добавления новых отказов пользователю достаточно внести новую запись в таблицу базы данных. Также предусмотрен доступ к таблице в режиме формы для пользователей с малым опытом работы с БД.

При работе ЭС предлагает несколько вариантов решений проблемы и выбор наиболее подходящего варианта для сложившейся ситуации остается за оператором.

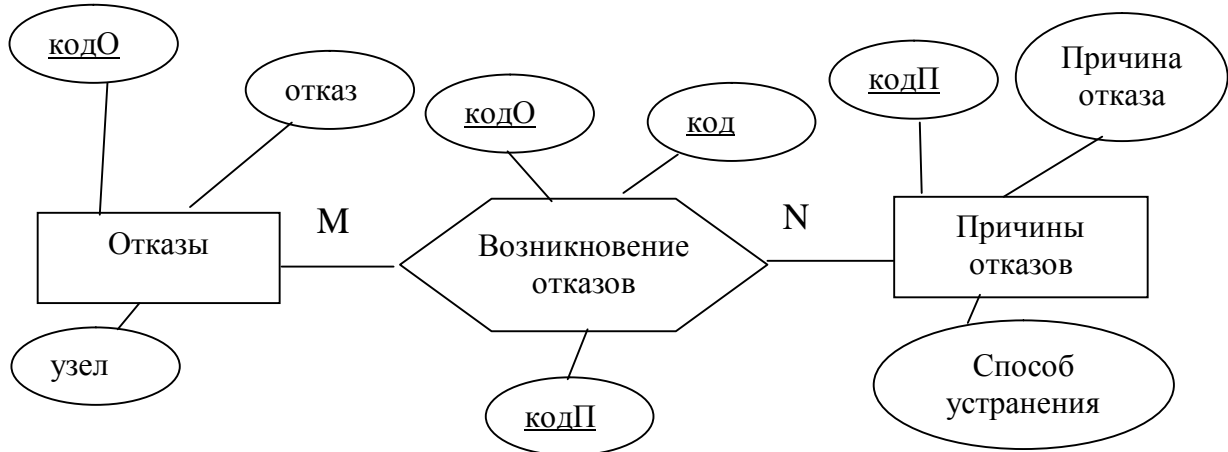


Рис. 2. ER-диаграмма базы данных отказов автоматизированного станочного модуля

Предметная область разрабатываемой ЭС представлена в виде продукционной модели. Продукционная модель или модель, основанная на правилах, позволяет представить знания в виде предложений типа «Если (условие)», «то (действие)». В разрабатываемой экспертной системе (ЭС) условием выступает неисправность, в качестве действия используется способ устранения неисправности. Под «условием» понимается некоторое предложение-образец, по которому осуществляется поиск в базе знаний, а под «действием» – действия, выполняемые при успешном исходе поиска. Выбор данной модели предметной области объясняется простотой реализации механизма логического вывода.

В предыдущей работе [5] был произведен обзор инструментальных средств разработки ЭС. На основании изложенного материала было принято решение реализации ЭС при помощи оболочки построения ЭС. На рис. 3 представлен логический блок реализации знаний ЭС для определения неисправности шпинделя АСМ ТПАРМ-100, построенный с помощью оболочки ЭС Exsys Corvid. Содержимое логического блока представлено на рис. 4.

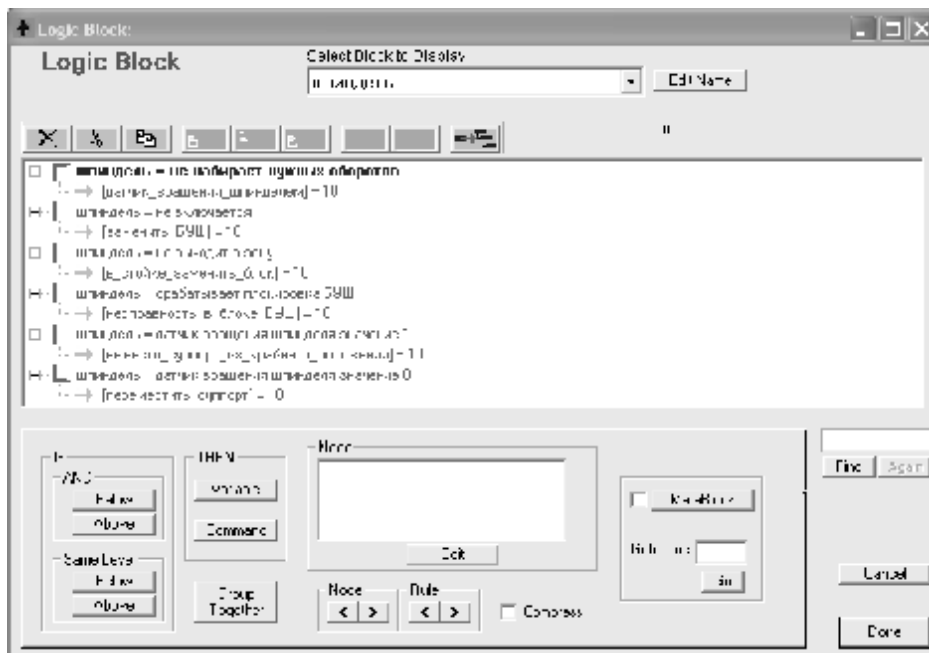


Рис. 3. Логический блок базы знаний экспертной системы

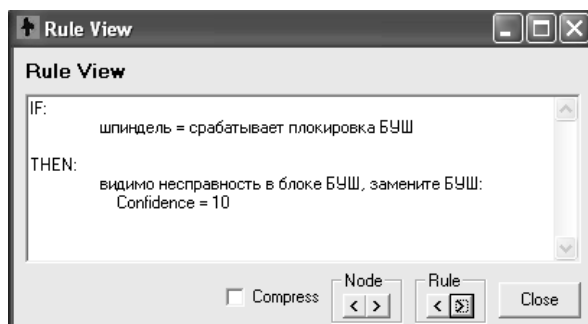


Рис. 4. Содержимое логического блока

На рис. 5 представлен интерфейс ЭС. При запуске программы пользователю предлагается из предложенного списка выбрать предполагаемый отказ, после опроса пользователя система выдает рекомендацию по устранению возникшей неисправности.

Интерфейс ЭС созданной при помощи оболочки Exsys Corvid системы понятен для пользователей с различным уровнем способностей, но недостатком такой системы является невозможность использования внешней БД отказов. Таким образом, при необходимости дополнения базы знаний ЭС существует необходимость привлечения программиста.

Эта проблема решается в оболочке Expro. На рис. 6 представлен редактор БЗ, реализованный в оболочке ЭС Expro.



Рис. 5. Интерфейс экспертной системы

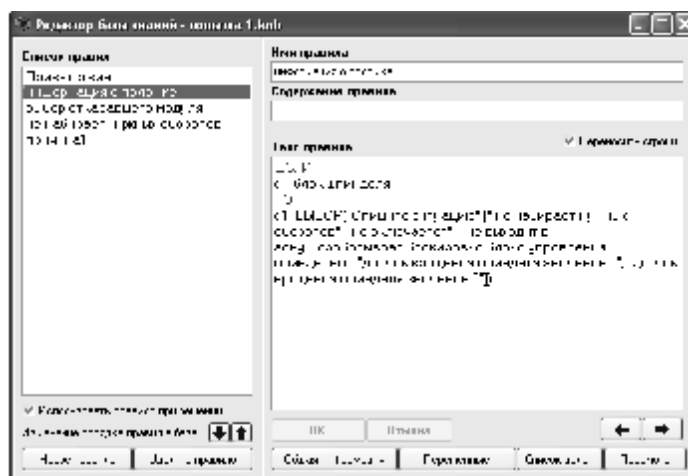


Рис. 6. Редактор баз знаний

При запуске программы система предлагает выбрать отказавший модуль в соответствии с рис. 7.

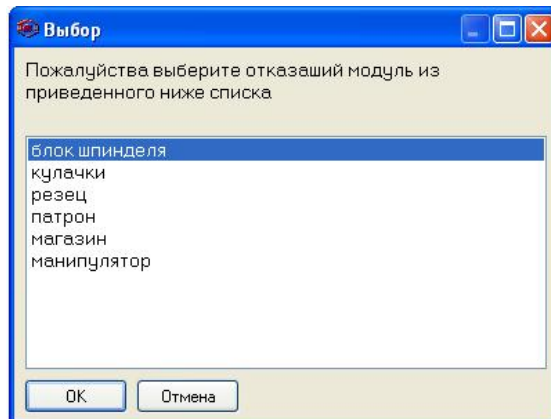


Рис. 7. Окно выбора отказавшего модуля

После выбора модуля (в данном случае шпиндель), система предлагает описать ситуацию, в соответствии с рис. 8.

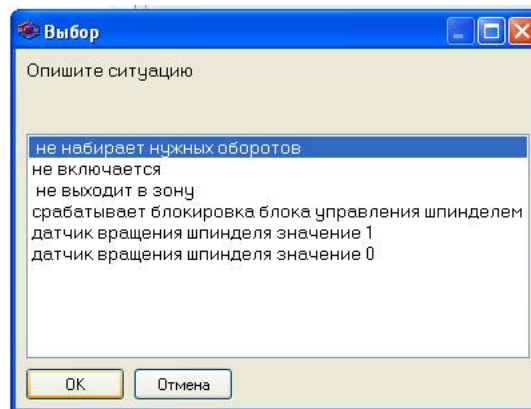


Рис. 8. Окно выбора ситуации

Результат опроса ЭС для определения причины «Не включается» представлен на рис. 9.

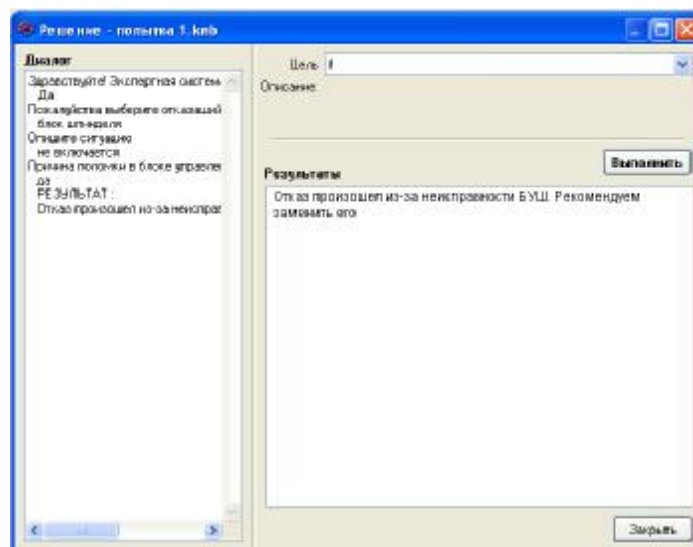


Рис. 9. Результат опроса

Еще одним преимуществом данной оболочки является то, что интерфейс ЭС позволяет просмотреть диалог пользователя с ЭС и тем самым показать ход рассуждения ЭС.

Использование экспертной системы поддержки принятия решений при диагностировании АСМ ТПАРМ-100 дает возможность в автоматизированном режиме выявить причины отказов элементов станка и тем самым позволит спрогнозировать ремонтно-профилактические работы, снизить уровень затрат на ремонтные работы, повысить качество изготавливаемой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нейлор К. Как построить свою экспертную систему/ К. Нейлор; пер. с англ. Н.Н. Слепова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 286 с.
2. Джексон П. Введение в экспертные системы / П. Джексон. 3-е изд. М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. 624 с.
3. Юркевич В.В. Экспертная система для токарной обработки / В.В. Юркевич // Вестник машиностроения. 2010. № 6. С. 73-75.
4. Мелихов А.Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А.Н. Мелихов, Л.С. Берштейн, С.Я. Коровин. М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит., 1990. 272 с.
5. Козлова Т.Д. Обзор инструментальных средств для построения экспертной системы поддержки принятия решений для определения причин неисправностей технологических систем / Т.Д. Козлова // Прогрессивные технологии, материалы и режущие инструменты в машиностроении: Межвуз. сб. тр. Саратов: СГТУ, 2010. С. 180-183.

Козлова Татьяна Дмитриевна – аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Kozlov Dmitry Viktorovich – Post-graduate Student of the Department of «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Игнатьев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Ignatyev Aleksandr Anatolyevich – doctor of technical sciences, professor, head of Department «Automation and management of technological processes» the Saratov state technical university

Самойлова Елена Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Samoilova Elena Mihajlovna – Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of chair «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

О.А. Комлева, А.А. Игнатьев

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ FEMLAB

Рассматривается вопрос моделирования конструкции в программном комплексе и отображения изменения плотности магнитного потока в цилиндре магнитоэологического управляющего элемента

Магнитная жидкость, плотность магнитного потока, характеристики конструкции магнитоэологического управляющего элемента

O.A. Komleva, A.A. Ignatyev

**MODELING OF MAGNETICREOLOGIC CONTROLLING ELEMENT
In FEMLAB SOFTWARE COMPLEX**

Рассматривается Question of modeling to designs in software complex and displaying a changing density of magnetic flow in cylinder of magneticreologic реологического controlling element.

Magnetic liquid, density of magnetic flow, features to designs of magneticreologic controlling element

В настоящее время интенсивно осваиваются новые технологии, которые могут применяться в медицине, исследовательской и производственной деятельности (техника высоких температур и давлений, сверхнизкого вакуума, атомная энергетика, космос, океанские глубины, подземные недра), где непосредственное участие человека нежелательно либо зачастую вообще невозможно. Во всех сферах необходима определённая точность выполнения операций. При пайке или сборе микропроцессорных печатных плат или монтаже сверхточной аппаратуры, применяемой в космической отрасли, необходима отладка точного процесса. Такой процесс подразумевает использование робототехнической аппаратуры, но и она может работать с определенным отклонением [1]. В этом случае рационально использовать дополнительные магнитоэологические управляющие элементы (МУЭ), которые устанавливаются на исполнительный орган, тем самым уменьшают колебания в процессе и увеличивают точность операций. Основным методом снижения колебаний механических систем манипулятора является повышение демпфирования, подавляющее вредные колебания, уменьшающее коэффициент резонансного усиления, а также амплитуду и время затухания колебаний при ударном нагружении, в частности при врезании и выходе инструмента.

Разработанная конструкция магнитоэологического управляющего элемента основана на использовании магнитоэологической жидкости, которая под воздействием магнитного поля изменяет свои вязкожесткостные свойства, что позволяет регулировать частотные характеристики управляющего элемента, представленные на рис. 1. Магнитоэологический управляющий элемент выполнен из материала Ст. 3 и состоит из следующих составляющих элементов: корпуса; поршня; двух крышек; двух штоков.

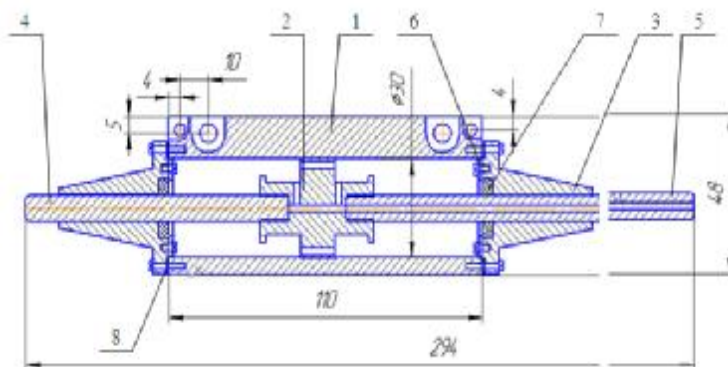


Рис. 1. Конструкция магнито реологического управляющего элемента
 1 – корпус; 2 – поршень-катушка; 3 – крышка; 4 – шток; 5 – шток с отверстием под кабельканал;
 6 – планка; 7 – уплотнительное кольцо; 8 – прокладка

Поршень и выполнен из материала Ст. 3, имеет вид цилиндра с зазором по центру. Габаритные размеры изделия 40×30 мм. Зазор необходим для наматывания витков провода катушки, который подводится к месту наматывания по пологому каналу, расположенному внутри поршня. В своем составе поршень имеет четыре пропускных канала для переливания жидкости из одной поршневой области в другую и две резьбы М8 для вворачивания штоков. Данная конструкция используется на работе серии МП-11 и установлена на его руке [2]. Принцип действия магнито реологического управляющего элемента основан на изменении плотности и вязкости магнито реологической жидкости внутри цилиндра при изменении подачи напряжения на катушку. При изменении вязкости магнито реологическая жидкость становится более плотной тем самым уменьшает колебательность, возникающую в процессе точечных операций. На основании конструкции нами была разработана модель (МУЭ) для того, чтобы увидеть распределение магнитного потока и его плотность внутри цилиндра в программном комплексе Femlab [3]. В разделе магнитостатика строим каркас цилиндра с катушкой (рис. 2). Представлен каркас МУЭ по заданным размерам.

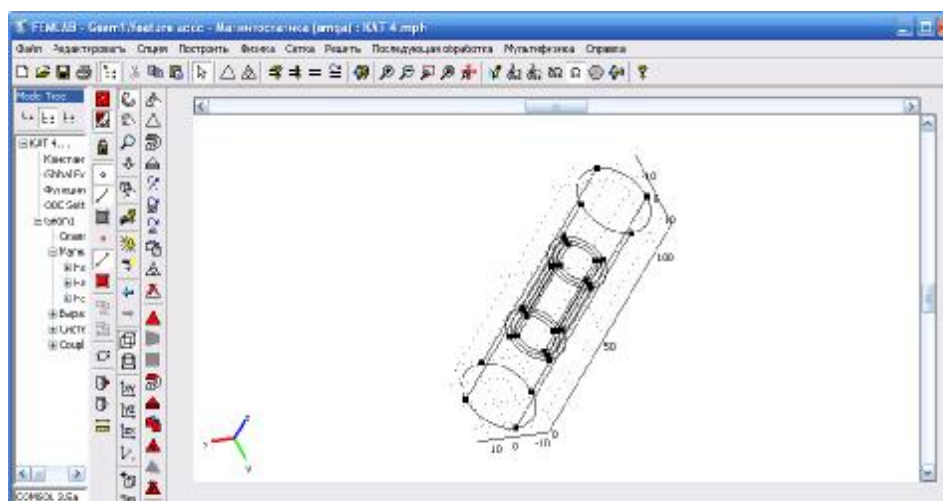


Рис. 2. Каркас магнито реологического управляющего элемента

В функциях настроек подобласти задаем параметры для построения физической модели (МУЭ) (рис. 3).

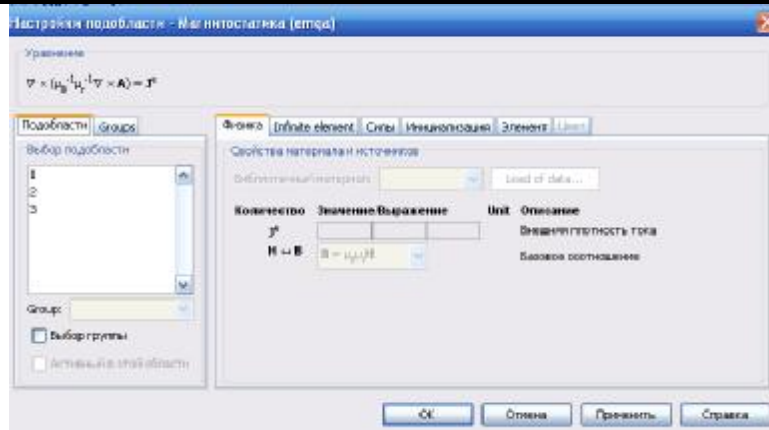


Рис. 3. Настройка подобласти физической модели магнитореологического управляющего элемента

На основании заданных физических свойств модели получим магнитореологический управляющий элемент на срезе изменения плотности магнитного тока (рис. 4).

На рисунке видно, что максимальное распределение плотности магнитного тока находится в области обмотки на катушке МУЭ. Это позволяет нам сделать вывод, что максимальное распределение тока осуществляется в области обмотки при подаче на нее напряжения, где изменяются и характеристики магнитореологической жидкости: плотность, вязкость.

Разработанная конструкция является эффективной при использовании на негабаритных рабочих органах при осуществлении точечных операций. МУЭ можно использовать и в габаритных робототехнических устройствах, применяющихся в атомной энергетике, и операций при высоких температурах. Но данная конструкция должна подвергнуться изменениям. При высоких температурах корпус МУЭ будет сильно нагреваться, тем самым изменит температуру внутри цилиндра, а значит составляющие компоненты магнитореологической жидкости изменят свои свойства. Чтобы этого избежать, смоделируем корпус МУЭ с эффектом обдува. В программном комплексе Femlab создадим развернутую сетку двумерной геометрии модели с заданным количеством желобов (рис. 5).

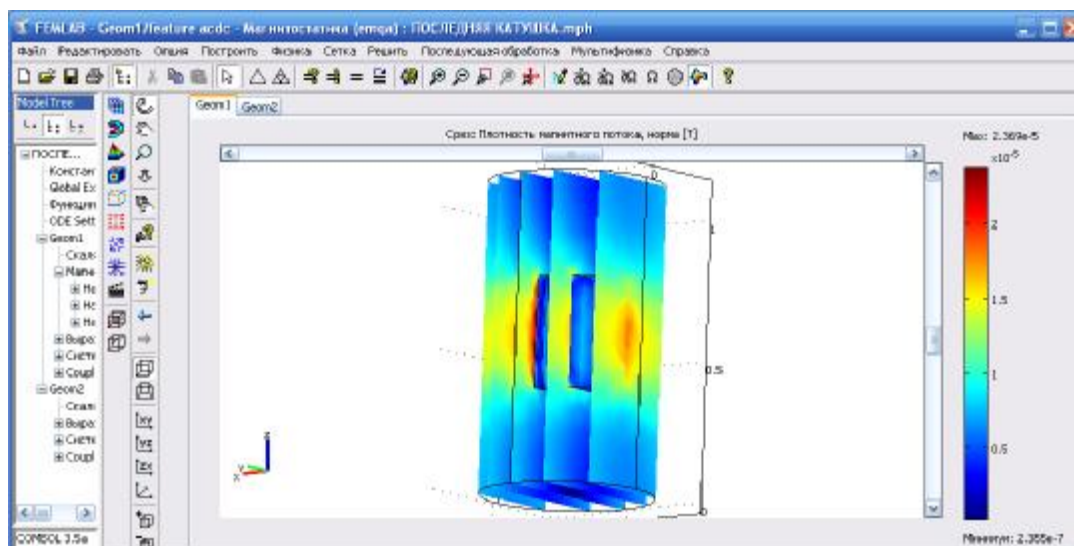


Рис. 4. МУЭ на срезе изменения плотности магнитного тока

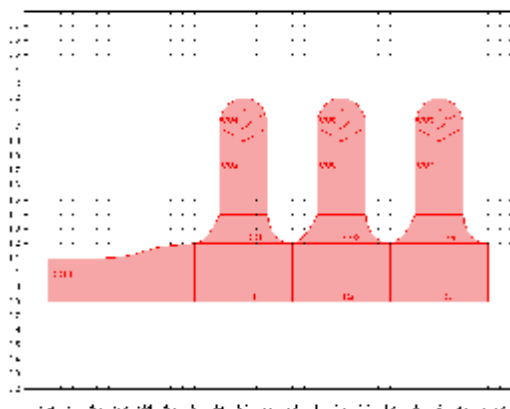


Рис. 5. Двумерная геометрия модели МУЭ

Разложим полученную модель в трехмерном пространстве с наложением сетки и выделением корпуса катушки внутри цилиндра (рис. 6).

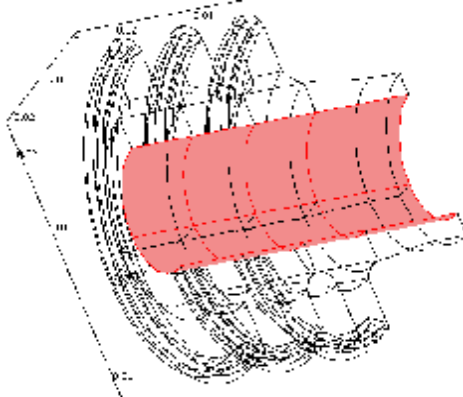


Рис. 6. Трехмерная модель МУЭ с эффектом обдува

Зададим граничные условия, которые представлены в таблице.

Граничные условия для температурного режима

Expression	Value
Hc	$K/D \cdot \text{graph}(\text{angle}) \cdot Gr^{0.25}$
angle	$90 + 180 \cdot \text{atan}(y/z) / \pi$
Gr	$g \cdot \beta \cdot (T - T_{\text{inf}}) / \nu^2 \cdot D^3$

Расчет основан на уравнении стационарного теплообмена

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = 0, \quad (1)$$

где k – теплопроводность материала, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; T – температура, К .

Граничные условия третьего рода представим следующим виде:

$$-n \cdot (-k \nabla T) = q_0 + h(T_{\text{inf}} - T), \quad (2)$$

где n – вектор нормали; h – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$; T_{inf} – температура окружающей среды, К .

Выражение для h со стороны внешней воздушной среды. Принимаем, что свободная конвекция на ребрах близка к конвекции вокруг цилиндра. Коэффициент теплообмена находим из критериального уравнения:

$$Nu = f(\theta) \cdot Gr^{1/4} \Rightarrow h = \frac{k}{L} f(\theta) \cdot Gr^{1/4}, \quad (3)$$

где k – теплопроводность воздуха, $k=0,06 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; L – характеристический размер, который в данном случае равен внешнему диаметру ребер (48 мм).

На основании заданных параметров получим модель МУЭ с распределенной температуры по корпусу (рис. 7).

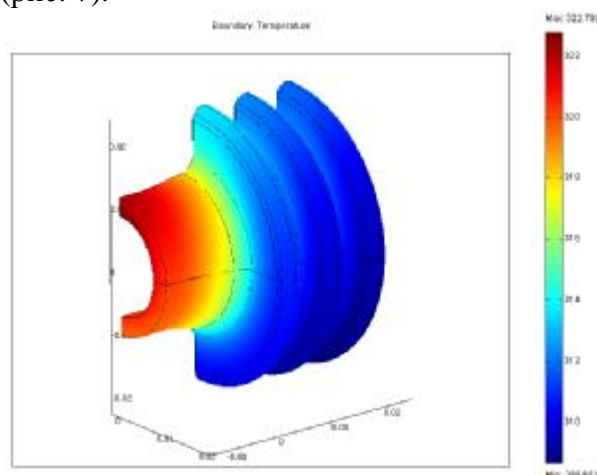


Рис. 7. Распределение температуры на МУЭ

Из рис. 7 видно, что нагрев происходит только на концах поршня, сама конструкция цилиндра и катушка не подвергается температурному изменению. Следовательно, работа МУЭ осуществляется стабильно. Такая модель цилиндра позволяет охлаждаться с помощью с моделируемых желобов и придвижение МУЭ обдувается потоками воздуха, тем самым не изменяя свойств магнито-реологической жидкости. Изменяя конфигурацию внешнего цилиндра, МУЭ можно использовать в различных отраслях и при различных условиях. Таким образом, моделирование в Femlab позволяет решать различные задачи применением магнито-реологического управляющего элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юревич Е.И. Основы робототехники / Е.И. Юревич. СПб: БХВ-Петербург 2005, 416 с.
2. Комлева О.А. Динамические характеристики электромагнито-жидкостного управляющего элемента / О.А. Комлева // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. №2(45). С. 116-120.
3. www.femlab.ru.

Комлева Оксана Анатольевна – аспирант кафедры «Управление и информатика в технических системах» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Игнатьев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Komleva Oksana Anatolyevna – Post-graduate Student the Department of «Management and Information Science in Technical Systems» of Balakovo Institute of Techniques, Technology and Management (branch) of Saratov State Technical University

Ignatyev Alexander Anatolevich – Doctor of technical sciences, professor, head. Department «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.941

В.В. Коновалов, А.А. Игнатъев

**МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ТОКАРНОГО СТАНКА
С УЧЕТОМ СТОХАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИЛ РЕЗАНИЯ**

Рассмотрено решение уравнений динамических процессов в станке в форме автокорреляционных функций.

Токарный станок, динамические процессы, автокорреляционная функция

V.V. Konovalov, A.A. Ignatyev

**PROCESS MODEL IN DYNAMIC LATHE SYSTEM WITH PROVISION FOR
STOCHASTIC CHARACTERISTICS OF CUTTING POWER**

Considered decision of equations of dynamic processes in the tool in the form autocorrelation functions.

Lathe, dynamic processes, autocorrelation function

Современные автоматизированные станки должны обеспечивать высокое качество обработки деталей для авиационной, автомобильной промышленности, железнодорожного транспорта, приборостроения и других отраслей. Для этого в их конструкции используются новые технические решения и материалы, высокоточные датчики различных параметров и быстродействующие микропроцессоры [1, 2].

Значения параметров качества обработки деталей на автоматизированных станках в значительной степени определяются их динамическими характеристиками, оптимальные значения которых должны рассчитываться на этапе проектирования и обеспечиваться на этапе изготовления конструкцией станка. Исследования точности станков показывают, что виброакустические колебания (ВА) элементов их конструкции существенно влияют как на погрешность формы деталей, которая в общем балансе погрешностей для прецизионных станков составляет 30...70%, так и на волнистость и шероховатость обработанной поверхности [3, 4]. Значительное влияние на улучшение динамических характеристик станков, в том числе и на этапе эксплуатации, оказывает использование результатов исследований, направленных на повышение параметров качества обработки и анализ их связи с жесткостью и колебаниями основных узлов формообразующей подсистемы станка. Уровень и характер (ВА) являются важными, а иногда и единственными критериями нормального функционирования узлов станка, так как служат обобщающими показателями его динамических свойств.

Для оценки динамических характеристик станков при их изготовлении и в процессе эксплуатации возникает необходимость в разработке методов и средств контроля, обеспечивающих оперативное получение информации и ее обработку. Исследования, выполненные в Саратовском государственном техническом университете, показывают, что динамические характеристики токарных станков можно оценивать как по переходным процессам при врезании инструмента в заготовку, так и при стационарном резании [4], основываясь, в частности, на ВА колебаниях резцового блока, имеющих как детерминированную, так и стохастическую составляющие. В обоих случаях используются специальные методы обработки стохастических сигналов с применением ЭВМ.

Построение модели динамических процессов в технологической системе (ТС) с учетом стохастических свойств сил резания служит теоретической основой экспериментальных методов оперативного оценивания динамического состояния станка.

Ранее в [5, 6] анализировалось влияние стохастических составляющих сил резания на характеристики процессов в системе резец-деталь, однако выводы по исследованиям касались либо устойчивости системы, либо плотности вероятности и дисперсий колебаний. В связи с этим целесообразно представляется идентификация динамических процессов в системе резец-деталь при резании с определением таких характеристик, которые не только достаточно просто интерпретируются, но и могут быть использованы для автоматизированной оценки динамического состояния станка.

Колебания в ТС станка включают, как известно, четыре вида колебаний: свободные, вынужденные, автоколебания и параметрические [3]. Свободные колебания являются быстро затухающими, автоколебания ограничивают предельные режимы черновой обработки, параметрические связаны с изменением значений параметров системы, что не учитывается в данном исследовании, поэтому для токарной обработки ограничимся анализом вынужденных колебаний при следующих исходных предположениях.

1. Взаимосвязь колебаний по всем трем координатным осям позволяет рассматривать однокоординатную динамическую модель, например, относительно оси X, колебания по которой наибольшим образом сказываются на параметрах точности формы и шероховатости поверхности детали.

2. При точении не рассматриваются вопросы устойчивости ТС и не принимается во внимание динамическая характеристика резания, не учитываются нелинейности, что позволяет описать динамику процессов в системе «резец-деталь» одним дифференциальным уравнением второго порядка

$$M \ddot{x} + H \dot{x} + Cx = \sum_{i=1}^N P_i^*(t), \quad (1)$$

где $x(t)$ – относительные колебания резца и заготовки; M, H, C – приведенные к резцу массы, коэффициент демпфирования и жесткость упругой системы; $\sum P_i^*(t)$ – совокупность сил,

воздействующих на систему. Уравнение (1) обычно преобразуется к виду

$$\ddot{x} + 2r\dot{x} + w_0^2 x = \sum_{i=1}^N P_i(t), \quad (2)$$

где $r = H/2M$, $w_0^2 = C/M$, $P_i(t) = P_i^*(t)/M$.

3. Правую часть уравнения (2) можно представить как сумму детерминированной составляющей силы резания $P_0(t)$ и стохастической составляющей $X(t)$ как стационарный случайный процесс (ССП) типа «белый шум» с нулевым математическим ожиданием, имеющим автокорреляционную функцию (АКФ)

$$K_{xz}(t) = S_0 d(t), \quad (3)$$

где $d(t)$ – дельта-функция, S_0 – постоянная величина.

После завершения переходного процесса точение осуществляется с почти постоянной силой резания. В этом случае ее можно рассматривать как ССП типа «белый шум» с ненулевым математическим ожиданием

$$M [P(t)] = P_0, \quad (4)$$

следовательно, данный режим резания можно считать стационарным в вероятностном смысле.

Таким образом, общий вид динамической модели представляется стохастическим дифференциальным уравнением

$$\ddot{x} + 2r\dot{x} + w_0^2 x = x(t). \quad (5)$$

Решение подобных уравнений может быть выполнено относительно как искомой переменной $x(t)$, так и моментных функций от $x(t)$, в частности АКФ $K_{xx}(t)$ [7, 8].

Под воздействием силы $P(t)$ величина $x(t)$ будет иметь детерминированную составляющую $x_0(t)$ и стохастическую составляющую $x_x(t)$

Для оценки свойств процесса $x_x(t)$ применяется метод решения стохастического дифференциального уравнения относительно АКФ, полученного из (5), в виде

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + 2r \frac{\partial}{\partial t} + w_0^2 \right)^2 K_{xx}(t) = K_{xx}(t). \quad (6)$$

Решение (6) дает для АКФ $K_{xx}(t)$ форму затухающей косинусоиды

$$K_{xx}(t) = \frac{S_0}{4w_0 r} e^{-r/t} \left(\cos w_1 t + \frac{r}{w_1} \sin w_1 t \right). \quad (7)$$

Результаты анализа модели системы «резец-деталь» в виде стохастического дифференциального уравнения показывают, что оценка качества процессов в ТС может выполняться при стационарном резании. Регистрируя виброакустические колебания при резании, можно затем вычислить АКФ, а далее, произведя соответствующую математическую обработку согласно методам теории автоматического управления, сформировать соответствующие оценки, коррелированные с динамическим состоянием ТС, что позволяет при минимизации оценок оптимизировать режим резания по параметрам точности обработанной поверхности. Так, например, исходя из вида АКФ (7) с использованием результатов измерений на токарных станках ПАБ-350 [9], можно определить передаточную функцию динамической системы станка при различных режимах резания, а затем, вычисляя запас устойчивости замкнутой системы, по его максимуму установить режим точения с наилучшими значениями показателей точности обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинский И.А. Концепция конкурентоспособных станков / И.А. Дружинский. Л.: Машиностроение, 1990. 247 с.
2. Бушуев В.В. Станкостроение: вчера, сегодня, завтра / В.В. Бушуев // Инженер. 2004. № 10. С. 8-11.
3. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
4. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков / Б.М. Бржозовский, В.А. Добряков, А.А. Игнатъев, В.В. Мартынов. Саратов: СПИ, 1992. 160 с.
5. Попов В.И. Динамика станков / В.И. Попов, В.И. Локтев. Киев: Техніка, 1975. 136 с.
6. Осман М. Ускоренные приемочные испытания станков при случайном характере сил резания / М. Осман, Т. Санкар // Конструирование и технология машиностроения. 1972. № 4. С. 59-64.
7. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем / В.В. Болотин. М.: Наука, 1979. 336 с.
8. Игнатъев А.А. Идентификация динамических процессов в технологической системе станка с учетом стохастических свойств сил резания / А.А. Игнатъев // Исследования станков и инструментов для обработки сложных и точных поверхностей: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 1994. С. 4-11.

9. Игнатъев А.А. Экспериментальные исследования виброакустических характеристик токарного станка ПАБ-350 / А.А. Игнатъев, В.В. Коновалов, А.Г. Мотков // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2011. С. 91-96.

Коновалов Валерий Викторович – аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Konovalev Valerij Viktorovich – the post-graduate student of chair «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Игнатъев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Ignatyev Aleksandr Anatolyevich – doctor of technical sciences, professor, head. Department «Automation and management of technological processes» the Saratov state technical university

Статья поступила в редакцию 23.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 537.311.5:517.956

Е.Н. Минаев

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ РАСЧЁТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Представлен принцип автоматизированного управления в системах катодной защиты металлических конструкций. Рассмотрен численно-аналитический метод расчёта стационарного электрического поля при определении параметров катодной защиты от коррозии плоских и цилиндрических поверхностей, контактирующих с агрессивными водными средами. В данном методе краевая задача с нелинейными граничными условиями сводится к дискретному аналогу интегрального нелинейного уравнения, которое решается методом итераций. Показаны относительно высокая скорость и широкая область сходимости итерационного процесса. Определены параметры защиты.

Электрическое поле, система управления, коррозия

E.N. Minaev

AUTOMATIC CONTROL OF CATHODIC PROTECTION SYSTEM BY CALCULATION OF ELECTRICAL FIELD WITH NONLINEAR BOUNDARY CONDITION

Numerical-analytical method for calculation of stationary electrical field is presented. It is used for definition of cathodic protection current of plane and cylindrical surface by contact with aggressive water-solution. In this method nonlinear boundary problem is replaced to the discrete analogy of integrate equation. This equation is solved by method of iteration. It is proved, that iteration method is suitable. Electrical current of protection is defined.

Electrical field, integrate equation, corrosion

Одним из эффективных способов понижения коррозии металлов является катодная поляризация [1]. Организация катодной защиты имеет два аспекта. Первый аспект (электрохимический) заключается в определении потенциала приэлектродного слоя в данной точке защищаемой поверхности и, соответственно, плотности внешнего тока на границе металл-электролит в этой точке, которые обеспечили бы понижение скорости коррозии до приемлемых значений. Поскольку существует не одно значение защитного потенциала, а некоторый интервал, нужно определить зависимость изменения скорости коррозии в этом интервале. Данный вопрос решается на основе законов электрохимической кинетики [2], в соответствии с ней растворение металла состоит из двух процессов: анодного и катодного, которые могут быть пространственно разъединены. Катодная и анодная реакции осуществляются частицами разного сорта. Анодный процесс или собственно коррозия реализуется в основном ионами металла, переходящими с поверхности в раствор.

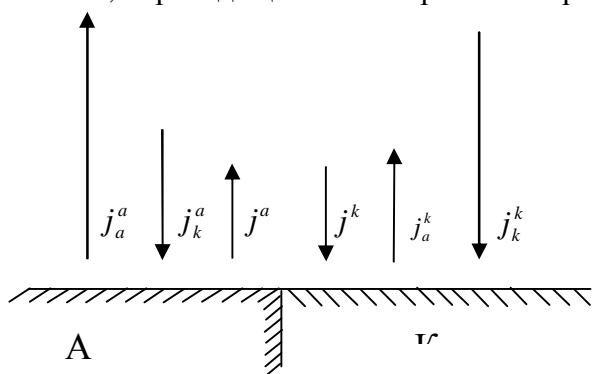


Рис. 1. Суммарные и парциальные плотности тока на электродах

Сопутствующий катодный процесс – ионами водорода или молекулами кислорода, при этом они принимают электроны и восстанавливаются. При пространственном разделении поверхности на макроанод и макрокатод на обоих электродах протекают как анодные, так и катодные реакции, но на аноде преобладает анодная, а на катоде – катодная реакция (рис.1), где j_a^a, j_k^a соответственно плотности токов анодного растворения на аноде и на катоде, j_a^k, j_k^k – соответственно плотности токов катодного восстановления деполяризатора на аноде и на катоде,

j^a, j^k – суммарные (внешние) плотности токов анода и катода, которые в дальнейшем будем обозначать как j . Скорости реакции подчиняются кинетическим законам Тафеля, при

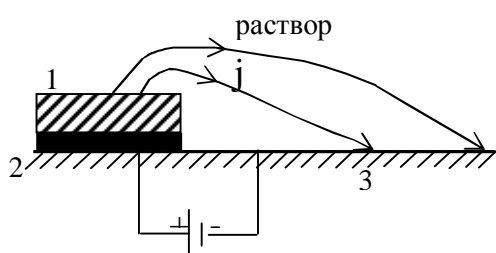


Рис. 2. Принцип работы системы катодной защиты: 1 – анод, 2 – электроизоляция, 3 – катод (защищаемая поверхность)

определённых условиях скорость процесса может тормозиться диффузией деполяризатора [2]. Теория данного процесса была разработана А.Н. Фрумкинским [3], согласно этой теории, общей переменной, благодаря которой катодная и анодная реакции взаимосвязаны, является электродный потенциал j . Каждая из реакций, отдавая или принимая электроны, влияет на величину потенциала, а тем самым на скорость другой одновременно протекающей реакции. В отсутствии внешней поляризации устанавливается общий для обеих реакций потенциал, обычно называемый компромиссным. По мере смещения потенциала в сторону отрицательных значений скорость анодного растворения уменьшается, а скорость катодного восстановления увеличивается.

Сущность катодной защиты металла заключается в преднамеренном понижении приэлектродного потенциала (катодная поляризация). Технически она осуществляется за счёт подключения металлической поверхности к «минусу» источника постоянного тока (рис. 2).

Электрохимический аспект проблемы рассмотрен нами в [4,5,6], в них представлены метод определения скорости коррозии при катодной поляризации, а также защитные потенциалы в типичных условиях эксплуатации.

Второй аспект организации катодной защиты – математический. Поскольку реальные металлические конструкции имеют протяжённые размеры, а электропроводность коррозионных водных сред на много меньше, чем у металлов, наблюдается значительная неравномерность распределения потенциала в растворе и по поверхности металла, то есть система анод – раствор – защищаемая поверхность имеет рассосредоточенные параметры. По мере увеличения расстояния от участка защищаемой поверхности до анода, потенциал уменьшается и может оказаться недостаточным. Возникает вопрос о радиусе действия анода или о величине тока на аноде, который бы обеспечил защиту по всей поверхности. Расчёт распределения потенциала сводится к решению стационарного дифференциального уравнения в частных производных. В РФ вопросы расчёта электрического поля применительно к прогнозированию коррозии и определению характеристик систем защиты были рассмотрены в работах Ю.Я. Иоссея, Г.Э. Клёнова, Э.С. Кочанова и др. [7, 8]. Учитывая специфику электрохимических систем, граничные условия на поверхности, как правило, являются разнородными с преобладанием условий третьего рода. В общем случае граничные условия – нелинейные. Именно этот случай рассмотрен в данной работе.

Рассмотрим плоскую поверхность на которой размещена система периодически повторяющихся протяжённых полосовых анодов шириной порядка несколько сантиметров каждый. Над поверхностью расположен неограниченный объем жидкости. Пусть задано расстояние между соседними анодами $2x_N$. Будем исходить из условия, что катодная защита осуществляется по всей поверхности, тогда в точке x_N должен поддерживаться минимальный защитный потенциал j_{\min} . Расчёт катодной защиты заключается в определении тока на аноде, при котором это требование выполняется. Запишем дифференциальное уравнение плоскопараллельного поля

$$\frac{\partial^2 j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 j}{\partial y^2} = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad 0 < y < \infty, \quad (1)$$

где x – координата, направленная вдоль поверхности, y – координата, направленная по нормам вглубь раствора, $j = j(x, y)$ – потенциал в объёме жидкости. С учётом периодичности распределения потенциала, достаточно ограничиться областью $0 < x < x_N$, причём на границах этой области выполняются условия

$$\frac{\partial j}{\partial x} = 0, \quad x=0, \quad 0 < y < \infty, \quad \frac{\partial j}{\partial x} = 0, \quad x=l, \quad 0 < y < \infty, \quad (2)$$

где принято обозначение $l = x_N$. На границе металл-раствор со стороны жидкости задана нелинейная зависимость между плотностью тока и потенциалом, которая в электрохимии имеет название поляризационная кривая

$$I \frac{\partial j}{\partial y} = f(j), \quad y=0, \quad 0 < x < l, \quad (3)$$

I – удельная электропроводность раствора. Типичный вид этой кривой представлен на рис. 3 [6]. Как показывают исследования автора, ниже точки перегиба она может быть аппроксимирована степенной зависимостью с показателем степени меньше единицы

$$j = a_0 (-j)^{a_1}, \quad (4)$$

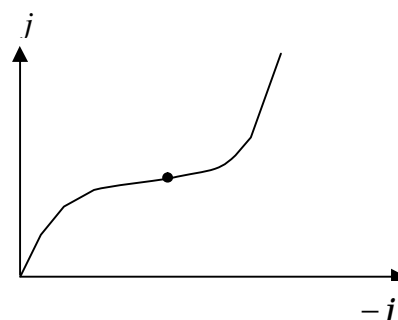


Рис. 3. Нелинейная зависимость на поверхности катода

а выше этой точки – экспоненциальной зависимостью

$$j = b_0 \exp\left(\frac{j^* - j}{b_1}\right) + j_0. \quad (5)$$

С учётом граничных условий (2) применим к краевой задаче интегральное косинус - преобразование с конечными пределами интегрирования

$$\bar{j}_k(y) = \int_0^l j(x, y) \cos\left(\frac{kp}{l}x\right) dx, \quad (6)$$

$$j(x, y) = \frac{j_0}{l} + \frac{2}{l} \sum_{k=1}^{\infty} \bar{j}_k(y) \cos\left(\frac{kp}{l}x\right). \quad (7)$$

Тогда уравнение (1) преобразуется в обыкновенной дифференциальное уравнение для изображения $\bar{j}_k(y)$

$$\frac{d^2 \bar{j}_k}{dy^2} - \left(\frac{kp}{l}\right)^2 \bar{j}_k = 0, \quad 0 < y < \infty, \quad (8)$$

решение которого с учётом условий на бесконечности ($y \rightarrow \infty, \bar{j}_k \neq \infty$) имеет вид

$$\bar{j}_k(y) = A_k \exp\left(-\frac{kp}{l}y\right). \quad (9)$$

Найдём A_k из условия на границе (3), для чего применим к нему интегральное преобразование (6). Выполним последовательность преобразований

$$\frac{d\bar{j}_k}{dy} = \frac{1}{l} \int_0^l f(j(x)) \cos\left(\frac{kp}{l}x\right) dx, \quad y = 0', \quad (10)$$

$$-\frac{kp}{l} A_k = \frac{1}{l} \int_0^l f(j(x)) \cos\left(\frac{kp}{l}x\right) dx, \quad (11)$$

$$A_k = -\left(\frac{l}{pk}\right) \int_0^l f(j(x)) \cos\left(\frac{kp}{l}x\right) dx. \quad (12)$$

Подставляя A_k в выражение для изображения (9) и возвращаясь от изображения к оригиналу по формуле (7), найдём при $y = 0$

$$j(x, 0) = \frac{j_0}{l} - \frac{2}{pl} \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^l \frac{1}{k} f(j(x')) \cos\left(\frac{kp}{l}x'\right) \cos\left(\frac{kp}{l}x\right) dx'. \quad (13)$$

Чтобы получить интегральное уравнение, нужно поменять местами порядок интегрирования и суммирования. В результате образуется ядро интегрального уравнения

$$B(x, x') = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \cos\left(\frac{kp}{l}x'\right) \cos\left(\frac{kp}{l}x\right). \quad (14)$$

Рассмотрим сходимость данного ряда. Используя известные тригонометрические формулы и учитывая, что полученные ряды можно заменить элементарными функциями [9], выполним следующие преобразования

$$\cos\left(\frac{kp}{l}x\right) \cos\left(\frac{kp}{l}x'\right) = \frac{1}{2} \cos \frac{kp}{l}(x - x') + \frac{1}{2} \cos \frac{kp}{l}(x + x'), \quad (14.1)$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \cos \frac{kp}{l}(x - x') = -\ln\left(2 \sin \frac{p}{2l}(x - x')\right), \quad (14.2)$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \cos \frac{kp}{l}(x+x') = -\ln \left(2 \sin \frac{p}{2l}(x+x') \right) \quad (14.3)$$

$$B(x, x') = -\frac{1}{2} \left\{ \ln \left(4 \left| \sin \frac{p}{2l}(x-x') \cdot \sin \frac{p}{2l}(x+x') \right| \right) \right\}, \quad (14.4)$$

$$\sin \frac{p}{2l}(x-x') \cdot \sin \frac{p}{2l}(x+x') = \frac{1}{2} \left\{ \cos \frac{p}{l}x' - \cos \frac{p}{l}x \right\}, \quad (14.5)$$

$$B(x, x') = -\frac{1}{2} \ln \left\{ 2 \left| \cos \frac{p}{l}x' - \cos \frac{p}{l}x \right| \right\}. \quad (14.6)$$

При x стремящемся к x' , ядро $B(x, x')$ обращается в бесконечность, наблюдается особенность.

Возникшее затруднение автор предлагает решить следующим образом: формально перепишем граничное условие (3) в виде

$$l \frac{\partial j}{\partial y} = j, \quad y=0, \quad 0 < x < l, \quad (15)$$

где j – плотность тока на поверхности нелинейно зависящая от потенциала $j = f(j)$, и далее разобьём поверхность на малые участки $x_{n-1} < x < x_n$, в пределах которых плотность тока будет постоянной и равной j_n ($n = 1, 2, 3, \dots, N$). Обычно данная операция выполняется на конечном этапе построения вычислительного алгоритма, нами же она проведена при постановке задачи

$$\frac{\partial j}{\partial y} = \frac{1}{l} j_n, \quad y=0, \quad x_{n-1} < x < x_n. \quad (16)$$

Конечной целью расчёта является определение вектора плотностей тока на катоде ($j_2, j_3, j_4, \dots, j_N$). Анод расположен на участке $0 < x < x_1$, плотность анодного тока j_1 находится из условия электронейтральности

$$j_1 = -\sum_{n=2}^N j_n. \quad (17)$$

Применим к граничному условию (16) интегральное преобразование и найдём константы A_k в выражении (9)

$$\frac{d\bar{j}_k}{dy} = \frac{1}{l} \sum_{n=1}^N \int_{x_{n-1}}^{x_n} j_n \cos \left(\frac{kp}{l}x \right) dx, \quad y=0, \quad (18)$$

$$-\frac{kp}{l} A_k = \frac{l}{pl} \sum_{n=1}^N \frac{j_n}{k} \left(\sin \left(\frac{kp}{l}x_n \right) - \sin \left(\frac{kp}{l}x_{n-1} \right) \right), \quad (19)$$

$$A_k = -\frac{l^2}{p^2 l} \sum_{n=1}^N \frac{j_n}{k^2} \left(\sin \left(\frac{kp}{l}x_n \right) - \sin \left(\frac{kp}{l}x_{n-1} \right) \right). \quad (20)$$

Подставим найденное значение A_k в выражение для изображения (9) и, далее возвращаясь от него к оригиналу по формуле (7), получим

$$j(x, y) = \frac{\bar{j}_0}{l} - \frac{2l}{p^2 l} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^N \frac{j_n}{k^2} \left(\sin \left(\frac{kp}{l}x_n \right) - \sin \left(\frac{kp}{l}x_{n-1} \right) \right) \cdot \exp \left(-\frac{kp}{l}y \right) \cos \left(\frac{kp}{l}x \right). \quad (21)$$

Рассчитаем потенциал на границе $y=0$ и, поменяв местами суммирование по k и n , получим дискретный аналог интегрального уравнения

$$j(x,0) = \frac{\bar{j}_0}{l} - \frac{2l}{p^2 l} \sum_{n=1}^N j_n \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \left(\sin\left(\frac{kp}{l} x_n\right) - \sin\left(\frac{kp}{l} x_{n-1}\right) \right) \cdot \cos\left(\frac{kp}{l} x\right) \quad (22)$$

$$B(x_n, x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \left(\sin\left(\frac{kp}{l} x_n\right) - \sin\left(\frac{kp}{l} x_{n-1}\right) \right) \cdot \cos\left(\frac{kp}{l} x\right) \quad (23)$$

Поскольку ядро уравнения $B(x_n, x)$ является равномерно-сходящимся рядом, а такие ряды можно почленно складывать, изменение порядка суммирования по k и n справедливо.

Определить \bar{j}_0 из граничных условий не представляется возможным. Действительно, по определению косинус-преобразования

$$\bar{j}_0 = \int_0^l j(x, y) dx. \quad (24)$$

Применим это преобразование к уравнению Лапласа (1) и с учётом граничных условий (2) найдём

$$\frac{d^2 \bar{j}_0}{dy^2} + \int_0^l \frac{\partial^2 j(x, y)}{\partial x^2} dx = 0, \quad (25)$$

$$\frac{d^2 \bar{j}_0}{dy^2} + \frac{\partial j(l, y)}{\partial x} - \frac{\partial j(0, y)}{\partial x} = 0, \quad (26)$$

$$\bar{j}_0 = c_1 y + C. \quad (27)$$

Используя условие на бесконечности ($y \rightarrow \infty, \bar{j}_0 \neq \infty$), определим $\bar{j}_0 = C$. Так как всюду на границе заданы производные, определить C невозможно, поскольку для любой константы производная равна нулю. Таким образом, задача решена с точностью до неопределённой константы. Этот результат является ожидаемым. Стационарные краевые задачи, на границах которых заданы только производные, с точки зрения математической физики относятся к классу некорректных в том смысле, что не допускают однозначного решения [10]. Для придания краевой задаче корректности необходимо ввести некоторое дополнительное условие для определения C (условие однозначности). Вопрос о том, как задавать константу C , будет рассмотрен ниже.

Чтобы повысить скорость сходимости ряда $B(x_n, x)$, перейдём к средним по участкам $x_{m-1} < x < x_m$ значениям потенциала j_m

$$j_m = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{m-1}}^{x_m} j(x, 0) dx, \quad m = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (28)$$

Учитывая равномерную сходимость ряда и возможность его почленного интегрирования, внесём в выражении (22) знак интеграла под знак ряда и, вычислив интегралы от косинусов, прийдём к системе нелинейных уравнений относительно вектора потенциалов.

$$j_m = C - \frac{2l^2}{\Delta x p^3 l} \sum_{n=1}^{\infty} A_{m,n} \cdot j_n(j_n), \quad m = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (29)$$

где $j_n = j_n(j_n)$ – зависимость вида (4), (5) или какого-либо другого, а коэффициенты A_{mn} определяются числовыми рядами

$$A_{m,n} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^3} \left(\sin\left(\frac{kp}{l} x_n\right) - \sin\left(\frac{kp}{l} x_{n-1}\right) \right) \cdot \left(\sin\left(\frac{kp}{l} x_m\right) - \sin\left(\frac{kp}{l} x_{m-1}\right) \right) \quad (30)$$

Отметим, что предложенный метод следует отнести к группе методов граничных элементов (МГЭ), поскольку он удовлетворяет двум основным особенностям МГЭ: 1) Исходная

краевая задача, заданная в области, заменяется на эквивалентную, заданную только на границе этой области., причём дискретизация непрерывных функций требуется только на границе. В данном случае краевая задача (1), (2), (3), заданная на бесконечной полосе $0 < x < l, 0 < y < \infty$, заменяется эквивалентной системой уравнений (29), заданной на границе $0 < x < l$. 2) Существует некоторое аналитическое выражение, позволяющее определить искомую функцию в объёме, используя только её значения на границе без применения численных методов в объёме. В рассматриваемом случае таким аналитическим выражением является формула (21).

Решение системы уравнений (29) будем искать методом последовательных приближений (простой итерации). В развернутом виде итерационный процесс может быть представлен следующим образом

$$\begin{cases} j_1^p = C + B_{11}j_1^p + B_{12}j_2^p + B_{13}j_3^p + \dots + B_{1N}j_N^p \\ j_2^p = C + B_{21}j_1^p + B_{22}j_2^p + B_{23}j_3^p + \dots + B_{2N}j_N^p \\ j_3^p = C + B_{31}j_1^p + B_{32}j_2^p + B_{33}j_3^p + \dots + B_{3N}j_N^p \\ \dots \\ j_N^p = C + B_{N1}j_1^p + B_{N2}j_2^p + B_{N3}j_3^p + \dots + B_{NN}j_N^p \end{cases} \quad (31)$$

$$j_1^p = -\sum_{n=2}^N j_n^p, j_2^{p+1} = f(j_2^p), \dots, j_N^{p+1} = f(j_N^p),$$

где $p = 0, 1, 2, 3, \dots$ – номер итерации, R – номер последней итерации. Процесс прекращается, если

$$\sum_{n=1}^N |j_n^p - j_n^{p-1}| < e, \quad e \ll 1. \quad (32)$$

Далее осуществляется проверка, является ли последнее приближение решением системы уравнений. Это делается простой подстановкой

$$\begin{cases} j_1^R = f_1(j_1^R, j_2^R, j_3^R, \dots, j_N^R) \\ j_2^R = f_2(j_1^R, j_2^R, j_3^R, \dots, j_N^R) \\ \dots \\ j_N^R = f_N(j_1^R, j_2^R, j_3^R, \dots, j_N^R) \end{cases}, \quad (33)$$

В основе метода последовательных приближений лежит понятие о сжимающем отображении [11,12]. Вектор-функция $\vec{f} = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_N)$ является оператором F , заданным в пространстве N -мерных векторов $(j_1, j_2, j_3, \dots, j_N)$. Для таких пространств норму можно ввести несколькими способами. Нами используется норма и метрика r [12]

$$\|\vec{j}\| = \max_n |j_n|, \quad r(\vec{j}, \vec{j}^p) = \max_n |j_n - j_n^p|. \quad (34)$$

Если оператор F является сжимающим, то итерационный процесс (31) сходится к решению, причем решение является единственным. Достаточным условием сжимаемости оператора F для данной метрики является условие [12]

$$\max_j \max_m \sum_{n=1}^N \left| \frac{\partial f_m}{\partial j_n} \right| = q < 1, \quad (35)$$

$$\frac{1}{a} = \max_j \left| \frac{\partial j_n}{\partial j_n} \right|, \quad (36)$$

$$q \leq \frac{2l^2}{\Delta x p^3 l a} \max_m \sum_{n=1}^N |A_{m,n}| < 1. \quad (37)$$

Следует подчеркнуть, что это условие является достаточным, но не является необходимым, или, другими словами, если оно выполняется, то итерационный процесс гарантировано сходится к решению, если же оно не выполняется, то это ещё не означает расходимости. В последнем случае вопрос о сходимости решается непосредственно во время вычислений.

Как видно из выражения (36), коэффициент сжатия q обратно пропорционален интервалу разбиения поверхности на участки Δx . Возникает вопрос: не может ли попытка повышения точности за счёт уменьшения Δx (увеличения числа уравнений) привести к ухудшению сходимости или даже расходимости? Исследуем этот вопрос более подробно, для чего выделим из q составляющую q_1 , не зависящую от физико-химических исходных данных расчёта, учтём при этом, что $l/\Delta x = N$, где N – число уравнений

$$q_1 = \frac{2l^2}{\Delta x p^3} \max_m \sum_{n=1}^N |A_{m,n}|, \quad (38)$$

$$q_1 \leq \frac{2l^2}{\Delta x p^3} N \max_{m,n} |A_{m,n}| = \frac{2l}{p^3} N^2 \max_{m,n} |A_{m,n}|. \quad (39)$$

Используя тригонометрические формулы и учитывая, что косинус любого аргумента не превосходит по модулю единицы, запишем

$$\max_{m,n} |A_{m,n}| < 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^3} \sin^2 \left(\frac{kp}{2l} \Delta x \right), \quad (40)$$

$$\max_{m,n} |A_{m,n}| < 2 \sum_{k=1}^{\infty} \left| \frac{1}{k^3} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^3} \cos \left(\frac{kp}{l} \Delta x \right) \right|. \quad (41)$$

Заменим ряд в последнем выражении повторным интегралом J [9] и введем обозначения $a = p\Delta x/l = p/N$

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^3} \cos \left(\frac{kp}{N} \right) = \int_0^a dz \int_0^z \ln \left(2 \sin \frac{t}{2} \right) dt + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^3}, \quad (42)$$

$$2J = (\ln 2)a^2 + a^2 \ln \frac{a}{2} - \frac{1}{2}a^2 - a^2 - \frac{a^4}{18 \cdot 8} - \frac{a^6}{16 \cdot 900 \cdot 8} - \dots, \quad (43)$$

$$2J = \frac{p^2}{N^2} \left(-1,2 + \ln \left(\frac{p}{2N} \right) \right), \quad (43a)$$

$$q_1 \leq \frac{2l}{p} \left(-1,2 + \ln \left(\frac{p}{2N} \right) \right), \quad (44)$$

В выражении (43) члены со степенями выше второй не учитываются ввиду их малости. Проведём оценку увеличения q_1 при увеличении N используя (44). При увеличении числа уравнений в 5 раз (от 10 до 50), q_1 увеличился менее чем в 1,5 раза, то есть незначительно. На самом деле увеличение q_1 ещё меньше, так как оценка (44) сильно завышена. Проведенные вычислительные эксперименты, о которых будет сказано ниже, подтверждают независимость или слабую зависимость скорости сходимости от числа уравнений.

Для проверки работоспособности алгоритма проводился расчёт тестовой задачи, в качестве которой использовалась задача (1), (2), (3), но условие (3) заменялось линейным. Такая задача может быть решена одним из классических аналитических методов, например методом интегральных преобразований. Эта задача имеет самостоятельный интерес при расчё-

те электрического поля гальванопар или многоэлектродных систем при незначительной разности потенциалов между электродами, порядка (10-50) мВ. Поэтому рассмотрим её подробней. Пусть на аноде малой ширины $0 < x < x_1$ задана плотность тока j_a , а на протяжённом катоде $x_1 < x < x_N$ задана линейная связь между потенциалом и плотностью тока. За точку отсчёта потенциала на катоде примем его собственный коррозионный потенциал в отсутствии внешнего поля. Тогда краевая задача имеет вид ($x_N = l$)

$$\frac{\partial^2 j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 j}{\partial y^2} = 0, \quad 0 < x < l, \quad 0 < y < \infty, \quad (45)$$

$$\frac{\partial j(0, y)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial j(l, y)}{\partial x} = 0, \quad (46)$$

$$l \frac{\partial j}{\partial y} = j_a, \quad y = 0, \quad 0 < x < x_1, \quad (47)$$

$$j - al \frac{\partial j}{\partial y} = 0, \quad y = 0, \quad x_1 < x < l, \quad (48)$$

где a – удельная поляризуемость металла в растворе. Поскольку на одной и той же координатной поверхности x заданы разнородные граничные условия (смешанная задача), то её нельзя решить аналитическими методами, но, учитывая малость ширины анода, автор предложил способ сведения смешанных граничных условий к условиям третьего рода, в таком виде задача может быть решена аналитически. Преобразуем формально условие (47), домножив слева и справа на a и прибавив потенциал

$$j - al \frac{\partial j}{\partial y} = -a j_a + j, \quad y = 0, \quad 0 < x < x_1. \quad (49)$$

Учтём, что ввиду малости ширины анода распределение потенциала на нём можно заменить средним значением

$$j \approx \frac{1}{\Delta x} \int_0^{x_1} j(x, 0) dx. \quad (50)$$

В этом состоит приближённость решения. Если данное условие выполняется недостаточно точно, разобьём анод на два или три участка меньшей ширины. Перепишем граничные условия с учётом проделанных преобразований

$$j - al \frac{\partial j}{\partial y} = \begin{cases} C_2, & 0 < x < x_1, \quad y = 0 \\ 0, & x_1 < x < x_N, \quad y = 0 \end{cases}, \quad (51)$$

$$C_2 = -a j_a + \frac{1}{\Delta x} \int_0^{x_1} j(x, 0) dx, \quad \Delta x = x_1. \quad (52)$$

Будем решать данную третью краевую задачу так, как – будто константа C_2 известна, и в процессе решения получим уравнение для её определения. Применим к задаче (45), (46), (51) косинус-преобразование. Поскольку некоторые этапы решения уже рассмотрены в нелинейной задаче, они будут опущены. Изображение для потенциала $\bar{j}_k(y)$ имеет вид

$$\bar{j}_k(y) = A_k \exp\left(-\frac{kp}{l} y\right). \quad (53)$$

Применим интегральное преобразование к граничному условию (51)

$$\bar{j}_k - al \frac{d\bar{j}_k}{dy} = C_2 \frac{l}{kp} \sin \frac{kp}{l} x_1, \quad (54)$$

$$A_k = C_2 \frac{l}{p} \frac{\sin \frac{kp}{l} x_1}{(1 + al \frac{kp}{l})k}. \quad (55)$$

Перейдём к определению \bar{j}_0 . Выполняя те же преобразования, что и при решении нелинейной задачи (преобразования (24)-(27)), и используя для определения \bar{j}_0 граничное условие (51), получим

$$\int_0^l j(x,0) - al \int_0^l \frac{\partial j(x,0)}{\partial y} = C_2 x_1, \quad (56)$$

$$\bar{j}_0 / l = C_2 x_1 / l. \quad (57)$$

Отметим, что если при нелинейной постановке для определения \bar{j}_0 нужно вводить дополнительное условие (условие однозначности), то в данном случае этого не требуется, так как краевая задача (45)-(48) является корректной и \bar{j}_0 находится по формуле (57). Возвращаясь от изображения к потенциалу, запишем его распределение по границе $y = 0$

$$j(x,0) = C_2 \left\{ \frac{x_1}{l} + \frac{2}{p} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{kp}{l} x_1\right) \cos\left(\frac{kp}{l} x\right)}{(1 + al \frac{kp}{l})k} \right\}. \quad (58)$$

Вычисляя интеграл в выражении (52), найдём уравнение для определения C_2

$$C_2 = -a j_a + C_2 \left\{ \frac{x_1}{l} + \frac{2l}{p^2 x_1} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2\left(\frac{kp}{l} x_1\right)}{(1 + al \frac{kp}{l})k^2} \right\}. \quad (59)$$

Определив C_2 и подставляя его в (58), найдём распределение потенциала на поверхности и далее, используя граничное условие (48), рассчитаем распределение плотности тока на катоде.

Тестовые расчёты заключались в следующем: сначала было рассчитано распределение потенциала и плотности тока по формулам (58), (48), а затем эта же задача решалась методом последовательных приближений по схеме (31), где связь между потенциалом и плотностью тока на границе определялась линейным соотношением (48), которое может быть записано в виде

$$j(j) = \frac{1}{a} j. \quad (60)$$

Во всех ниже приведённых расчётах итерационный процесс прекращался, если $e < 10^{-4}$. При расчётах использовали следующие электрохимические данные [13]: удельная электропроводность морской воды при температуре $200^0 C$ $l = 19,10 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, удельная поляризуемость стали в этих условиях $a = 0,068 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$. Первая серия расчётов проводилась при ширине защищаемой поверхности $l = x_N = 1 \text{ м}$, ширине анода и интервале разбиения $\Delta x = 0,1 \text{ м}$ (10 уравнений) и плотности тока на аноде $j_a = 10 \text{ А/м}^2$. В качестве нулевого приближения брали равномерное распределение плотности тока по катоду $j_n = 3 \text{ А/м}^2$ (пер-

вый вариант), $j_n = 0,03 \text{ A}/\text{m}^2$ (второй вариант), $j_n = 30 \text{ A}/\text{m}^2$ (третий вариант). Во всех вариантах итерационный процесс сошёлся к точному решению за 8,9 итераций. В четвёртом варианте Δx уменьшили вдвое, увеличив число уравнение до 20. Итерационный процесс достиг точного решения за 8 итераций. В табл. 1 представлены результаты расчёта одного из вариантов.

Таблица 1

Итерационный процесс при $l = 1 \text{ м}$, $\Delta x_1 = \Delta x_n = 0,1 \text{ м}$, $N = 10$, p – номер итерации

$x, \text{ м}$	Плотность тока $j_n, \text{ A}/\text{m}^2$					
	Расчёт по (58), (48)	$p=0$ -	$p=1$ $e = 18,2$	$p=3$ $e = 0,52$	$p=6$ $e = 2 \cdot 10^{-3}$	$p=8$ $e = 2 \cdot 10^{-5}$
0,15	1,44	3,0	1,991	1,463	1,450	1,449
0,25	1,25	3,0	1,455	1,268	1,259	1,258
0,35	1,15	3,0	1,154	1,162	1,157	1,157
0,45	1,10	3,0	0,948	1,091	1,091	1,091
0,55	1,04	3,0	0,801	1,041	1,044	1,044
0,65	1,00	3,0	0,695	1,00	1,012	1,011
0,75	0,99	3,0	0,620	0,991	0,989	0,989
0,85	0,97	3,0	0,573	0,975	0,975	0,975
0,95	0,96	3,0	0,550	0,968	0,968	0,968

Во второй серии вычислительного эксперимента длина защищаемой поверхности – 3 м, $\Delta x = 0,3 \text{ м}$, плотность тока на аноде $j_a = 60 \text{ A}/\text{m}^2$. Начальное приближение – равномерное распределение с плотностью $j_n = 2 \text{ A}/\text{m}^2$ (первый вариант), число итераций $p=31$. Во втором варианте начальное приближение $j_n = 0,1 \text{ A}/\text{m}^2$, число итераций $p=34$. В третьем варианте число уравнений увеличили до 20, потребовалось 34 итерации. Отметим, что уменьшение скорости сходимости во второй серии связано с увеличением ширины защищаемой поверхности l (см. формулу (44)). В табл. 2 представлен процесс сходимости последовательных приближений в одном из вариантов.

Таким образом, вычислительные эксперименты показали работоспособность предложенного алгоритма, относительно высокую скорость сходимости, устойчивость к увеличению числа уравнений и изменению нулевого приближения. Последнее свидетельствует об относительно широкой области сходимости.

Убедившись в работоспособности алгоритма, приступим непосредственно к расчету систем катодной защиты в нелинейной постановке. При этом нужно было решить вопрос о задании константы C (условие однозначности). Можно, например, задать нулевое приближение потенциала на аноде j_1 , а C найти из первого уравнения системы (29)

Таблица 2

Итерационный процесс при $l = 3 \text{ м}$, $\Delta x_n = 0,3 \text{ м}$, $\Delta x_1 = 0,1 \text{ м}$, $N = 10$, p – номер итерации

$x, \text{ м}$	Плотность тока $j_n, \text{ A}/\text{m}^2$					
	Расчёт по (58), (48)	$p=0$ -	$p=1$ $e = 20,0$	$p=10$ $e = 0,26$	$p=20$ $e = 5 \cdot 10^{-3}$	$p=31$ $e = 8 \cdot 10^{-5}$
0,25	5,20	0,1	6,201	5,483	5,501	5,501
0,55	3,20	0,1	3,878	3,217	3,232	3,232
0,85	2,37	0,1	2,754	2,369	2,379	2,379
1,15	1,92	0,1	2,029	1,908	1,913	1,913

1,45	1,62	0,1	1,524	1,628	1,627	1,627
1,75	1,45	0,1	1,165	1,451	1,444	1,444
2,05	1,33	0,1	0,917	1,338	1,326	1,326
2,35	1,26	0,1	0,760	1,271	1,255	1,255
2,65	1,22	0,1	0,684	1,241	1,222	1,222

$$C = j_1 - \sum_{n=1}^N B_{1n} \cdot j_n(j_n), \quad (61)$$

а затем решать систему уравнений

$$j_m = j_1 + \sum_{n=1}^N (B_{m,n} - B_{1n}) j_n(j_n), \quad m = 2, 3, 4 \dots N. \quad (62)$$

Но такой путь неоптимален. По условию расчёта нужно найти такой ток анода, который бы обеспечил защиту по всей поверхности, в том числе и на её конце

$$j(x_N) = j_N = j_{\min}, \quad (63)$$

но, так как начальное приближение j_1 выбирается наудачу или из каких-либо приближительных оценок, то потребуются рассчитать исходную задачу(1)-(3) несколько раз, постепенно уточняя j_1 , до тех пор, пока не будет достигнуто условие (63). Если же мы введём условие (63) в явном виде, то определим нужное значение тока на аноде с первого раза. Таким образом, C определяется из последнего уравнения системы (29)

$$C = j_{\min} - \sum_{n=1}^N B_{N,n} \cdot j_n(j_n), \quad (64)$$

и решается система уравнений

$$j_m = j_{\min} + \sum_{n=1}^N (B_{m,n} - B_{N,n}) j_n(j_n), \quad m = 1, 2, 3, 4 \dots (N-1), \quad (65)$$

при этом число уравнений и число неизвестных уменьшается на единицу. Именно система уравнений (65) используется при практических расчётах. Расчёт нескольких вариантов тестовых линейных и практических нелинейных задач, но уже при помощи системы (65), показал, что алгоритм не ухудшился ни по скорости, ни по области сходимости.

Проводились расчёты систем катодной защиты стали в морской воде при температуре $20^{\circ}C$, удельная электропроводность воды – $4,32 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, минимальный защитный потенциал $j_{\min} = -138 \text{ мВ}$, коэффициенты нелинейной зависимости (5): $b_0 = 0,024 \text{ А/м}^2$, $b_1 = 55,65 \text{ мВ}$, $j^* = -138 \text{ мВ}$, $j_0 = 0,2 \text{ А/м}^2$ [13]. При $60^{\circ}C$ удельная электропроводность – $7,60 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, минимальный защитный потенциал $j_{\min} = -74 \text{ мВ}$, коэффициенты зависимости (5): $b_0 = 0,037 \text{ А/м}^2$, $b_1 = 45,23 \text{ мВ}$, $j^* = -74 \text{ мВ}$, $j_0 = 0,35 \text{ А/м}^2$ [13].

Расчёт показал следующее. Если температура $20^{\circ}C$, ширина поверхности $l = 1 \text{ м}$, число уравнений $N = 10$, то число итераций $p=4$, плотность тока на аноде $j_1 = 2,1 \text{ А/м}^2$. При $60^{\circ}C$, $l = 1 \text{ м}$, число итераций оказалось $p=4$, плотность тока анода $j_1 = 3,61 \text{ А/м}^2$. При $20^{\circ}C$, $l = 3 \text{ м}$, числе уравнений $N = 30$, решение получили за 14 итераций, при этом плотность тока анода $j_1 = 12,4 \text{ А/м}^2$. При $60^{\circ}C$, $l = 3 \text{ м}$, $N = 30$, за 40 итераций нашли $j_1 = 28,5 \text{ А/м}^2$. Как и при расчёте тестовых задач, увеличение ширины поверхности привело к уменьшению скорости сходимости, что согласуется с оценкой (44). Следует подчеркнуть, что в качестве нулевого приближения можно было использовать распределение плотности тока, полученное на основе решения линейной задачи (45)-(48), однако мы исходили из наи-

худшего случая полного отсутствия информации и во всех вариантах расчёта начальное приближение выбирали произвольно, в виде равномерного распределения с плотностью $j_n = 0,1 \text{ A}/\text{м}^2$. Это делалось с целью ещё раз подтвердить широкую область сходимости алгоритма.

Представляет интерес сравнение результатов расчёта при линейной и нелинейной постановке задачи. Это позволяет ответить на вопрос: насколько необходима нелинейная постановка, или может для технических расчётов достаточно линейного приближения. Для ответа на этот вопрос решали линейную задачу, используя тот же алгоритм (31), но граничное нелинейное условие (5) заменяли линейным (60). Если при расчёте тестов одну и ту же линейную задачу решали двумя разными методами: точным классическим и численным методом последовательных приближений, то в данном случае наоборот, две разные задачи (линейную и нелинейную) решали одним и тем же методом последовательных приближений. Сравнение приведено в табл. 3 и 4, где представлены плотность тока анода j_1 и первые восемь (из 29) плотностей тока на катоде.

Таблица 3

Распределение плотности тока при $l = 3 \text{ м}$, $t = 20^\circ \text{ C}$, $N = 29$

плотность тока, $\text{A}/\text{м}^2$	j_1	j_2	j_3	j_4	j_5	j_6	j_7	j_8	j_9
нелинейная задача	-12,40	3,79	1,07	0,66	0,49	0,41	0,35	0,32	0,30
линейная задача	-10,19	0,93	0,73	0,62	0,55	0,50	0,45	0,42	0,39

Таблица 4

Распределение плотности тока при $l = 3 \text{ м}$, $t = 60^\circ \text{ C}$, $N = 29$

плотность тока, $\text{A}/\text{м}^2$	j_1	j_2	j_3	j_4	j_5	j_6	j_7	j_8	j_9
нелинейная задача	-28,51	12,66	2,46	1,45	1,01	0,80	0,67	0,59	0,54
линейная задача	-18,69	1,85	1,43	1,20	1,05	0,94	0,85	0,78	0,72

Основным результатом расчёта является плотность тока на аноде. Как видно из таблиц, при температуре 20° C отличие этих плотностей тока при линейной и нелинейной постановке задачи составляет более 20%, при 60° C – более 50%. Второй важной характеристикой расчёта служит плотность тока на участках катода вблизи анода (j_2, j_3, j_4). Эта характеристика важна с точки зрения исследования эффекта «перезащиты», связанного с выделением газообразного молекулярного водорода на поверхности, часть которого, перемещаясь в раствор, разрушает защитные плёнки, а другая часть, перемещаясь в глубь металла, вызывает его водородное охрупчивание и потерю прочности. При 20° C различие j_2 при линейной и нелинейной постановке составляет около 300 %, при 60° C – около 500%. Приведённое сравнение убедительно свидетельствует о необходимости учёта нелинейных граничных условий при расчёте катодной защиты.

Перейдём к расчёту электрического поля внутренних поверхностей цилиндрических аппаратов и трубопроводов, заполненных раствором. С учётом осевой симметрии задачи, запишем дифференциальное уравнение и граничные условия

$$\frac{\partial^2 j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial j}{\partial r} + \frac{\partial^2 j}{\partial x^2} = 0, \quad 0 < x < l, \quad 0 < r < R, \quad (66)$$

$$\frac{\partial j}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad 0 < r < R, \quad \frac{\partial j}{\partial x} = 0, \quad x = l, \quad 0 < r < R, \quad (67)$$

$$-l \frac{\partial j}{\partial r} = j_n, \quad r = R, \quad 0 < x < l, \quad n = 1, 2, 3 \dots N, \quad (68)$$

где r – радиальная координата, R – радиус трубопровода. Применим к уравнению (66) интегральное преобразование (6) и получим обыкновенное дифференциальное уравнение для изображения \bar{j}_k

$$\frac{d^2 \bar{j}_k}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d \bar{j}_k}{dr} - \left(\frac{kp}{l} \right)^2 \bar{j}_k = 0, \quad (69)$$

решение которого может быть выражено через функцию Макдональда $K_0(t)$ и модифицированную функцию Бесселя мнимого аргумента $I_0(t)$ нулевого порядка [14]

$$\bar{j}_k(r) = A_k I_0\left(\frac{kp}{l} r\right) + B_k K_0\left(\frac{kp}{l} r\right) \quad (70)$$

где A_k, B_k – неизвестные константы, определяемые из граничных условий. При $r = 0$ потенциал и его изображение имеют конечные значения, в то время, как $K_0(0) \rightarrow \infty$. Отсюда следует $B_k = 0$, и решение преобразуется к виду

$$\bar{j}_k(r) = A_k I_0\left(\frac{kp}{l} r\right) \quad (71)$$

Константу интегрирования A_k найдём из граничного условия (68), применив к нему интегральное преобразование (6) и выполнив следующие преобразования:

$$\frac{d \bar{j}_k}{dr} = -\frac{1}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \int_{x_{n-1}}^{x_n} j_n \cos\left(\frac{kp}{l} x_n\right) dx, \quad r = R, \quad (72)$$

$$\frac{d \bar{j}_k}{dr} = \frac{kp}{l} A_k I_1\left(\frac{kp}{l} r\right), \quad (73)$$

$$A_k = -\frac{l^2}{p^2 l} \sum_{n=1}^N \frac{j_n}{k^2} \left(\sin\left(\frac{kp}{l} x_n\right) - \sin\left(\frac{kp}{l} x_{n-1}\right) \right) \frac{1}{I_1(kpR/l)}. \quad (74)$$

Подставим найденное значение A_k в выражение для изображения (71) и, далее возвращаясь от него к самому потенциалу по формуле (7), получим на поверхности $r = R$

$$j(x, R) = C - \frac{2l}{p^2 l} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^N \frac{j_n}{k^2} \left(\sin\left(\frac{kp}{l} x_n\right) - \sin\left(\frac{kp}{l} x_{n-1}\right) \right) \frac{I_0(kpR/l)}{I_1(kpR/l)} \cos\left(\frac{kp}{l} x\right) \quad (75)$$

В выражениях (73)-(75) $I_1(t)$ есть модифицированная функция Бесселя мнимого аргумента первого порядка. По аналогии с плоской поверхностью поменяем местами суммирование по k и по n , далее перейдём к средним по участкам $x_{m-1} < x < x_m$ потенциалам j_m . После интегрирования по x , получим систему нелинейных уравнений относительно j_m , которая не отличается от системы (29), за исключением коэффициентов $A_{m,n}$, определяемых числовыми рядами

$$A_{m,n} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^3} \left(\sin\left(\frac{kp}{l} x_n\right) - \sin\left(\frac{kp}{l} x_{n-1}\right) \right) \cdot \left(\sin\left(\frac{kp}{l} x_m\right) - \sin\left(\frac{kp}{l} x_{m-1}\right) \right) \cdot \frac{I_0(kpR/l)}{I_1(kpR/l)}. \quad (76)$$

Отметим, что при отношении $R/l = 3$ и $k = 1$, отношение $I_0(t)/I_1(t) \approx 1,06$ и с увеличением k быстро стремится к единице [14], а коэффициенты $A_{m,n}$ цилиндрической задачи

стремятся к коэффициентам $A_{m,n}$ плоской задачи. Следовательно, плоскую задачу можно рассматривать как частный случай цилиндрической при $R/l > 3$.

Как и при расчётах плоскопараллельного поля, расчёт в цилиндрических координатах показал относительно высокую скорость сходимости (10)-(50) итераций. В качестве примера на рис. 4,5 представлено распределение плотности тока при различных параметрах.

В настоящее время на основе данного алгоритма, а также алгоритмов, представленных в [15, 16] формируется пакет прикладных программ.

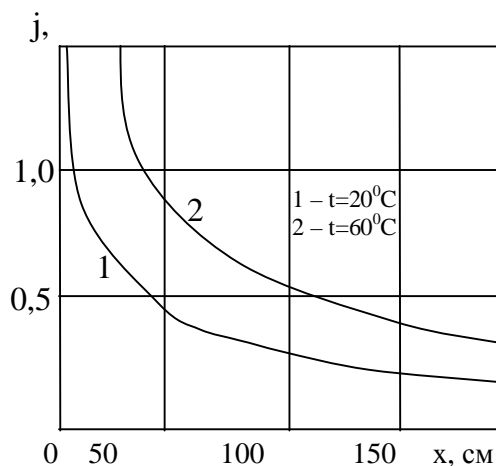


Рис. 4. Распределение катодной плотности тока по цилиндрической поверхности $l = 2 м, R = 1 м$

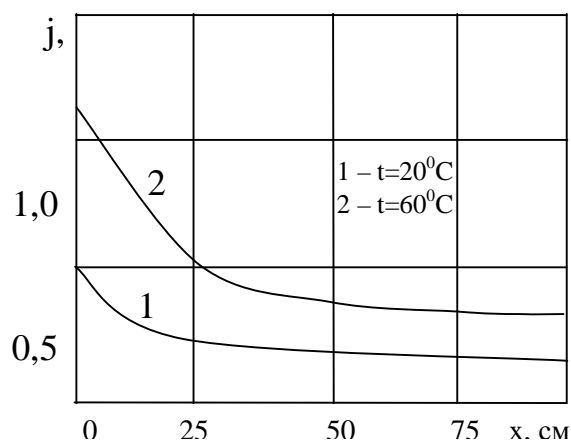


Рис. 5. Распределение катодной плотности тока по цилиндрической поверхности $l = 1 м, R = 0,3 м$

ЛИТЕРАТУРА

1. Бекман В. Катодная защита от коррозии / В. Бекман, В. Швенк. М.: Металлургия, 1984, 281 с.
2. Скорчеллетти В.В. Теоретические основы коррозии металлов / В.В. Скорчеллетти. Л.: Химия, 1973. 264 с.
3. Фрумкин А.Н. Кинетика электродных процессов / А.Н. Фрумкин, З.А. Иоффа, Б.Н. Кабанов. М.: Изд-во МГУ, 1952. 341 с.
4. Минаев Е.Н. Электрохимический метод определения скорости растворения металла при его катодной поляризации / Е.Н. Минаев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. №3(48), Вып.3. С. 79-88.
5. Минаев Е.Н. Алгоритм автоматизированного контроля и управления скоростью коррозии при катодной защите / Е.Н. Минаев, В.И. Вахлюева, В.Ф. Пулин // Проблемы управления, передачи и обработки информации: сб. тр. Саратов: СГТУ, 2009. С. 301-306.
6. Минаев Е.Н. Электрохимическая защита металла от коррозии / Е.Н. Минаев // Технологическая и природная безопасность: сб. тр. 1 Всероссийской научно-практической конференции, Саратов, 1-3 февраля 2011 г. Саратов: ИЦ Наука, 2011. С. 164-167.
7. Иоссель Ю.Я. Вопросы расчёта и моделирования электрохимической антикоррозионной защиты / Ю.Я. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. Л.: Судостроение, 1965. 428 с.
8. Иоссель Ю.Я. Расчёт и моделирование контактной коррозии судовых конструкций / Ю.Я. Иоссель, Г.Э. Клёнов, Р.А. Павловский. Л.: Судостроение, 1979. 297 с.
9. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. М.: Наука, ред. физ.-мат. литературы, 1980, 721 с.
10. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. М.: Наука, 1977. 528 с.

11. Колмогоров А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин, М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит. 1972. 347 с.
12. Демидович Б.П. Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. СПб.: Лань, 2007. 672 с.
13. Минаев Е.Н. Исследование электрических полей при катодной защите морской техники / Е.Н. Минаев, Г.П. Турмов // Исследования по вопросам повышения эффективности судостроения и судоремонта: сб. науч. тр. Вып. 37. Владивосток: ДВГТУ, 1996. С. 3-7.
14. Янке Е. Специальные функции (формулы, графики, таблицы) /Е. Янке, Ф.Эмде, Ф. Леш, М.: Физматгиз, 168, 344 с.
15. Минаев Е.Н. Метод расчёта электрического поля на границе металл-электролит при переменном коэффициенте поляризации вдоль границы / Е.Н. Минаев, В.П. Царёв // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. №3(48), Вып.3. С. 106-112.
16. Минаев Е.Н. Метод расчёта поля в электрохимической системе щель-плоская поверхность / Е.Н. Минаев // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. 22 Международ. науч. конф. Т.5. Псков: Изд-во Псков. гос. политех. ин-та, 2009. С. 57-60.

Минаев Евгений Николаевич –
доктор технических наук,
профессор кафедры «Общая физика»
Саратовского государственного
технического университета

Minaev Evgeny Nicolaevich –
Doctor of Technical Science,
Professor of the Department of «General Physics»
of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 11.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 65.011.56

А.Ю. Набилкин, С.А. Кравченко, Г.А. Гилев, В.П. Бирюков

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ

Предложена компьютерная система измерения сил резания при обработке на металлорежущих станках, разработано программное обеспечение для автоматизированного сбора и обработки данных, а также тарирования измерительной системы.

Сила резания, компьютерная система измерения, механическая обработка

A.Y. Nabilkin, S.A. Kravchenko, G.A. Gilev, V.P. Birukov

COMPUTER SYSTEM FOR MEASURING OF CUTTING FORCES

The computer system for measuring of cutting forces is proposed for sensing cutting forces in machining operations. The software is developed for computer-aided data acquisition and processing with option of calibration gauging of the measuring system.

Cutting force, computer measurement system, machining

Переменные упругие деформации технологической системы станка, возникающие при изменении сил резания в процессе токарной обработки, являются одним из факторов, влияющих на величину погрешности обработки. Поэтому используют различные автоматизированные системы управления, стабилизирующие упругие перемещения технологической системы при изменении припуска заготовки, твердости материала и других возмущающих воздействиях. Динамические характеристики процесса резания как объекта управления, статистические характеристики возмущающих воздействий для построения системы управления преимущественно исследуют экспериментальным путем, что требует наличия различных измерительных систем.

В Балаковском институте техники, технологии и управления разработана компьютерная система измерения сил резания. Данная система позволяет решать задачи исследования закономерностей технологического процесса, построения моделей процесса как объекта управления, нахождения оптимального режима резания и может быть использована для стабилизации процесса резания непосредственно в системах управления.

В качестве датчика используется тензодатчик балочного типа с мостовым включением производства фирмы ТЕНЗО-М [1]. Нормирующий преобразователь преобразует сигнал тензодатчика в нормированный сигнал 0-10 В. Выходной сигнал с преобразователя через устройство сбора аналоговой информации ЛА-2USB производства фирмы Руднев-Шиляев передается на компьютер.

Разработанное в среде LabView программное обеспечение позволяет производить:

- периодический опрос датчиков;
- статистическую обработку экспериментальных данных;
- архивирование полученных результатов;
- построение временных рядов сил резания в процессе обработки, гистограмм, автокорреляционных функций, спектральных плотностей полученных случайных процессов [2];
- использовать полученные результаты при выявлении закономерностей процесса и построении математических моделей.

Главное окно программы показано на рис. 1. Мгновенное значение силы резания выводится на милливольтметр 1 и цифровой индикатор. Временной ряд силы резания выводится на графике в окне 2. На рисунке показан временной ряд, полученный для тангенциальной силы резания при точении ступенчатой заготовки диаметром 30 мм при следующих режимах резания: $v = 112,5$ м/мин, $s = 0,2$ мм/об, $t = 0,5$ мм.

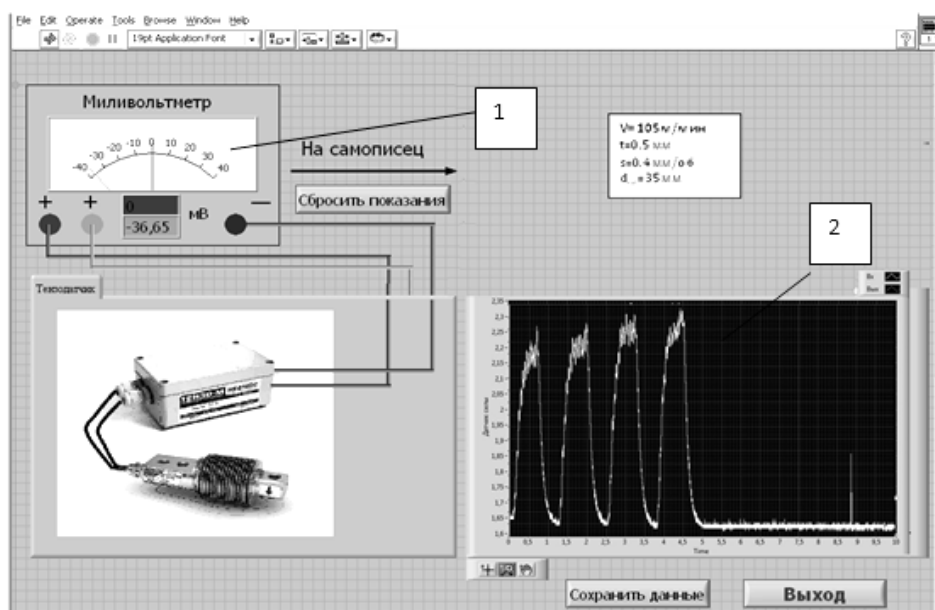


Рис. 1. Главное окно программы измерения силы резания

Нормирующий усилитель, внешнее устройство АЦП и вспомогательные устройства сопряжения и питания объединены в один блок с возможностью подключения к нему тензодатчиков. Это позволяет проводить измерения с использованием датчиков с различными характеристиками. Датчики разной чувствительности позволяют измерять силы резания различной максимальной амплитуды

Система тарирования датчика содержит специальную рычажную систему (рис. 2).

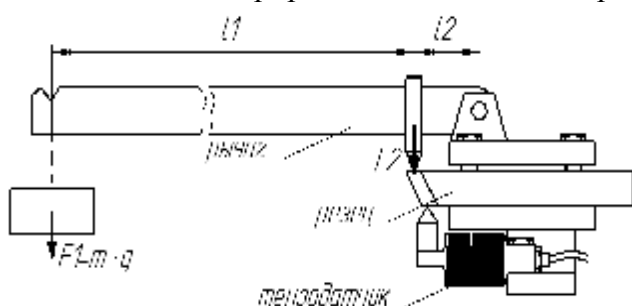


Рис. 2. Установка для тарирования датчика

Рычаг может поворачиваться вокруг горизонтальной оси. На расстоянии l_1+l_2 от оси вращения рычага подвешивается эталонный груз. На расстоянии l_2 от оси вращения к рычагу приварена призма, передающая усилие с рычага на резец. Это усилие через передающий элемент передается на датчик. Соответствующее этому грузу усилие рассчитывается исходя из уравнения статики для рычажной системы с учетом длин l_1 и l_2 . Тарирование датчика проводится перед каждой серией измерений.

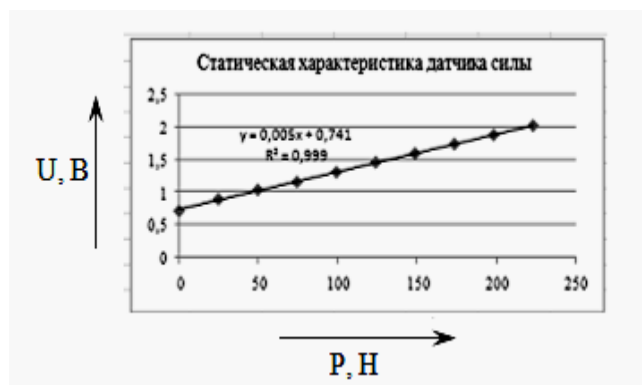


Рис. 3. Статическая характеристика, полученная в результате тарирования датчика силы

Эксперименты показали, что система измерения сил имеет линейную статическую характеристику. На рис. 3 показан пример статической характеристики датчика, полученной при тарировке. Данная статическая характеристика описывается регрессионным уравнением $U_{дат} = b_0 + b_1 P_z = 0,741 + 0,005 P_z$ с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,99$ [3]. Система настроена с предварительным натягом $P_0 = 0,74$ В (по выходному напряжению датчика).

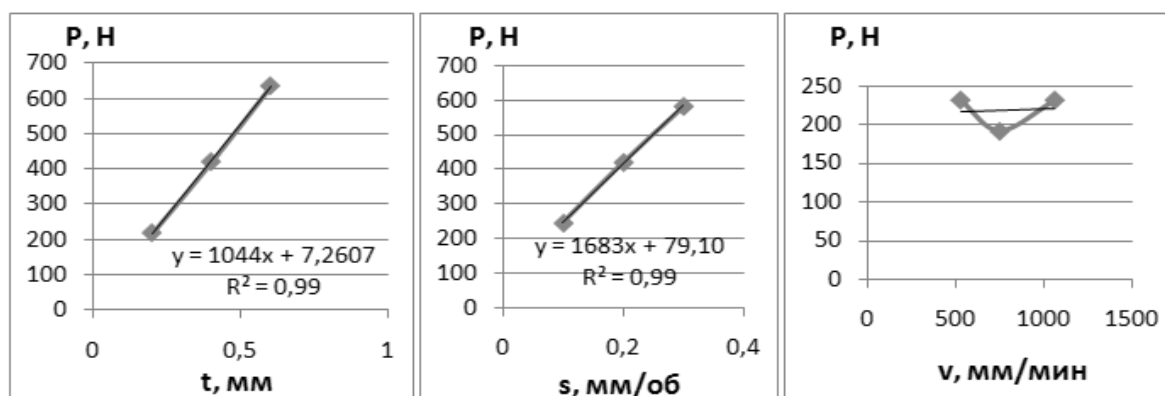


Рис. 4. Статические зависимости силы резания от режимов резания

На рис. 4 приведены экспериментальные данные статической зависимости силы резания от глубины резания, подачи и скорости резания, полученные с помощью измерительной системы. Данные показывают линейную зависимость тангенциальной силы резания от глу-

бины резания и подачи и нелинейную зависимость от скорости резания, что согласуется с литературными данными [4].

На рис. 5 показаны графики экспериментальных измерений силы резания, полученные с помощью описываемой системы, при точении заготовок с поперечными пазами (рис. 5 а) и при черновой обработке заготовки с неравномерным припуском (рис. 5 б).

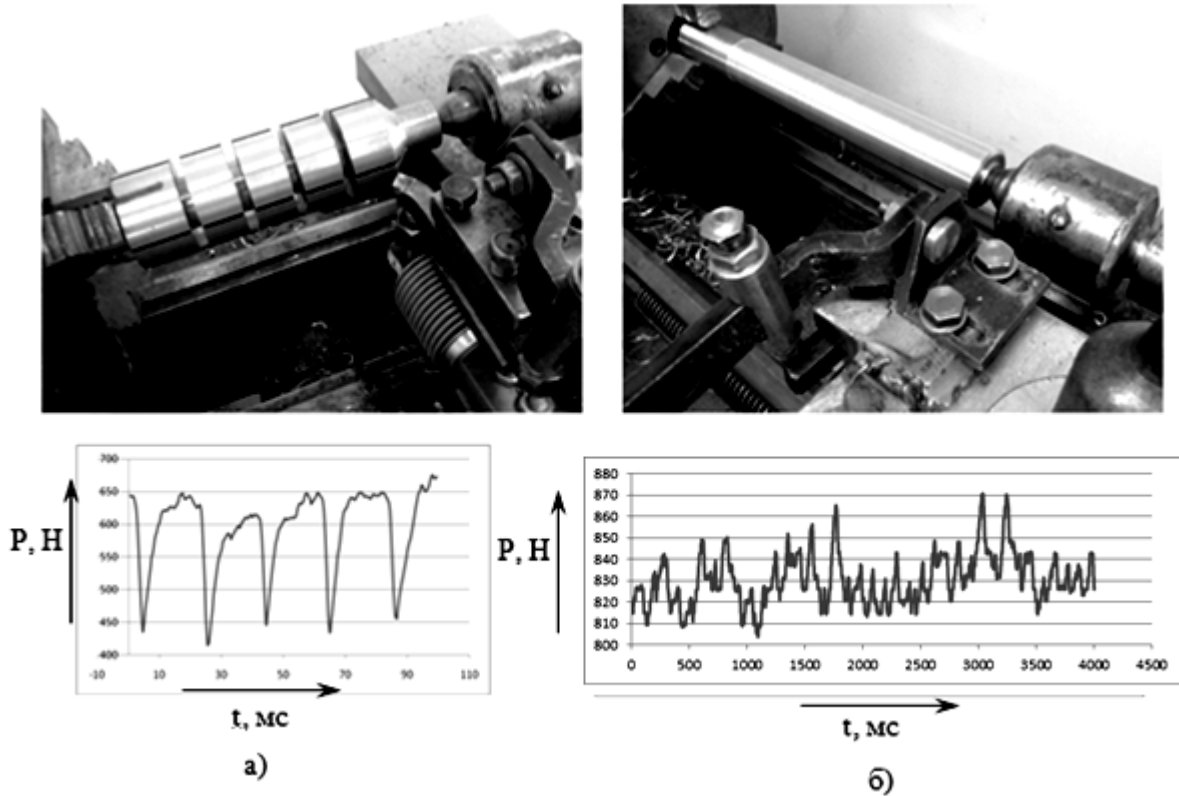


Рис. 5. а) Колебания силы резания при точении заготовки с четырьмя поперечными пазами ($V=19,5$ м/мин, $t=0,4$ мм, $s=0,35$ мм/об, $d_{зар}=46$ мм); б) Колебания силы резания при точении цилиндрической заготовки, обусловленные неравномерностью припуска ($V=54,9$ м/мин, $t=0,5$ мм, $s=0,4$ мм/об, $d_{зар}=33$ мм)

Выводы

1. В работе предложена компьютерная система измерения сил резания на основе тензометрического датчика.
2. Экспериментальные исследования системы показали ее высокую чувствительность и достаточное быстродействие для использования ее в составе системы управления силой резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. http://www.tenso-m.ru/pdf/601_T2.pdf
2. Солодовников В.В. Статическая динамика линейных систем управления / В.В. Солодовников. М.: Физматгиз, 1960. 576 с.
3. Дрепер Н. Прикладной регрессионный анализ / Н.Дрепер, Г. Смит. М.: Финансы и статистика, 1986. 392 с.
4. Резание материалов / Е.Н. Тримбач, Г.А. Мелетьев, А.Г. Схиртладзе и др. Старый Оскол: ТНТ, 2009. 512 с.

Набилкин Артем Юрьевич – аспирант кафедры «Технология и автоматизация в машиностроении» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Кравченко Станислав Алексеевич – аспирант кафедры «Технология и автоматизация в машиностроении» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Гилев Геннадий Андреевич – аспирант кафедры «Технология и автоматизация в машиностроении» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Бирюков Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и автоматизация в машиностроении» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Nabilkin Artem Yuryevich – Post-graduate Student the Department of «Technology and Automachine Building» of Balakovo Institute of Techniques, Technology and Management (branch) of Saratov State Technical University

Kravchenko Stanislav Alekseevich – Post-graduate Student the Department of «Technology and Automachine Building» of Balakovo Institute of Techniques, Technology and Management (branch) of Saratov State Technical University

Gilev Gennadiech Andreevich – Post-graduate Student the Department of «Technology and Automachine Building» of Balakovo Institute of Techniques, Technology and Management (branch) of Saratov State Technical University

Biryukov Vladimir Petrovich – doctor of technical sciences, professor, head. Department «Technology and Automachine Building» of Balakovo Institute of Techniques, Technology and Management (branch) of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 626.519

И.А. Рожков, А.А. Игнатьев, В.А. Иващенко

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ШЛИФОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ

Предложен подход к построению систем автоматизированного распознавания дефектов шлифованных поверхностей колец подшипников, обеспечивающий повышение качества идентификации дефектов и расширяющий набор (количество) распознаваемых дефектов.

Идентификация дефектов, подшипники, искусственные нейронные сети, автоматизированное управление

PERFECTION OF PROCESS TO RECOGNITION OF DEFECTS OF THE POLISHED OF SURFACES OF RINGS OF BEARINGS

The approach to construction of systems of the automated recognition of defects of the polished surfaces of rings of the bearings, providing improvement of quality of identification of defects and expanding set (quantity) of distinguished defects is offered.

Identification of defects, bearings, artificial neural networks, automated management

Введение

Одной из актуальных проблем при изготовлении подшипников является контроль качества обработки шлифованных поверхностей их деталей. Существует множество методов контроля: визуальные методы, метод травления, магнитные методы, электромагнитные (вихретоковые) методы и др. [1]. Наиболее эффективным из них является метод вихретокового контроля [1, 2], позволяющий выявлять дефекты как поверхностного слоя, так и прилегающих к нему слоев.

При контроле качества обработки поверхностей деталей подшипников важным является распознавание типа обнаруженных неоднородностей. Каждый дефект вызван определёнными факторами, например, вибрациями узлов технологического оборудования, неоднородностями физических и химических свойств заготовок деталей и др. [3]. Соответственно, определение типов неоднородностей позволяет целенаправленно воздействовать на причины их возникновения и тем самым оперативно производить наладку технологического процесса производства подшипников.

1. Автоматизация распознавания дефектов поверхностного слоя колец подшипников

Идентификация дефектов поверхностного слоя деталей подшипников с использованием сигнала вихретокового датчика (ВТД) включает следующие процедуры:

1. Предварительную обработку сигнала (фильтрация, нормализация, масштабирование и др.).
2. Выявление дефектных областей и формирование их признаков.
3. Распознавание дефектов на основе сформированных признаков.

На рис. 1 приведена структура автоматизированной системы распознавания дефектов. В блоке предварительной обработки сигнала происходит его фильтрация, нормализация и др. Выявление дефектов осуществляется в блоке локализации дефектов и формирования их классификационных признаков. Классификационные признаки могут формироваться как на основе сигнала ВТД, обработанного с помощью преобразования Фурье или вейвлет преобразования [4, 6], так и по результатам обработки сканированного изображения поверхности детали [5, 7].

В данной статье предлагается подход, основанный на совместном использовании статистических признаков сигнала ВТД и признаков, полученных на основе обработки сканированного изображения поверхности колец подшипников. Это даёт возможность использовать достоинства обоих методов. Обработка изображения поверхности сканируемой детали позволяет легко и наглядно выделить дефектные области, определить их размеры, форму и т.д. Однако при построении изображения зачастую проводятся усреднения, сжатия и другие преобразования исходных данных, что уменьшает их информативность. Чтобы избежать потерь информативности и получить дополнительные признаки для классификации необходимо перейти от выделенной на изображении дефектной области к соответствующему участку сиг-

нала ВТД. Процедура перехода от изображения области дефекта к соответствующему ей сигналу состоит из следующих шагов [7]:

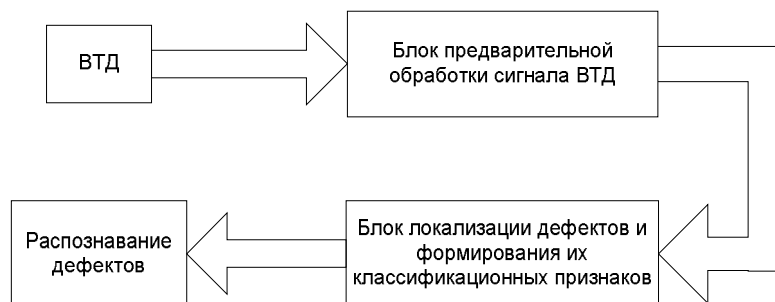


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы распознавания дефектов при обработке колец подшипников

1. При построении изображения поверхности сканируемой детали по сигналу ВТД сохраняется весь массив данных $M_{ВТД}$, полученных с ВТД, а также вычисляются масштабные коэффициенты K_x и K_y , которые показывают, какое количество элементов массива использовано для построения одного пикселя изображения.

2. На построенном таким образом изображении соответствующими алгоритмами выделяются дефекты и их границы (дефектные области).

3. С помощью масштабных коэффициентов K_x, K_y выделяется подмассив данных из $M_{ВТД}$, соответствующий локализованной дефектной области (рис. 2).



Рис. 2. Процедура обработки изображения поверхности изделия с дефектом

Перед построением изображения проводится сжатие и нормализация сигнала ВТД. Затем обработанный сигнал, который представляет собой двумерный массив, передаётся в процедуру построения изображения. Для выделения дефектных областей на изображениях используется быстрая процедура оценки на наличие дефектов, предложенная в [5]. Суть данной процедуры состоит в оценке среднеквадратичного отклонения (СКО) каждого столбца из матрицы пикселей изображения. Если значение СКО в рассматриваемой точке изображения превышает порог 3500 пунктов, то эта точка соответствует дефектному участку и остаётся на изображении, в противном случае она удаляется с изображения (закрашивается белым цветом). В результате на изображении остаются только дефектные участки (рис. 3). Причём, каждый дефектный участок ограничен белым цветом. Поэтому для локализации дефектов применяется алгоритм заливки произвольных ограниченных областей. В ходе работы алгоритма вычисляются площадь и периметр участка неоднородности, размеры ограничивающего дефект прямоугольника, необходимые для расчёта классификационных признаков.

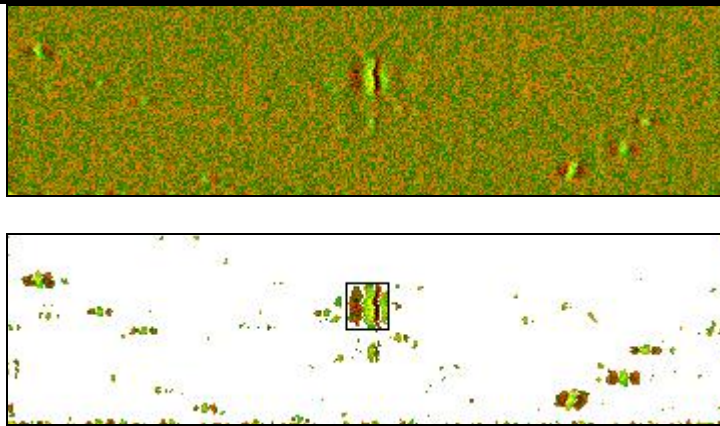


Рис. 3. Результаты выделения дефектных участков

Таким образом, в качестве признаков распознавания выступают:

1. **Признаки, полученные на основе обработки сканированного изображения поверхности колец подшипников:**

- 1) средний уровень сигнала изображения в области дефекта K_0 ;
- 2) коэффициент заполнения области дефекта $K_1 = S_0 / S_p$, где S_0 – площадь участка неоднородности, а S_p – площадь ограничивающего прямоугольника;
- 3) коэффициент изрезанности области первого типа (отношение периметра ограничивающего прямоугольника к периметру неоднородности) $K_2 = P_0 / P_p$, где P_p – периметр ограничивающего прямоугольника, а P_0 – периметр области дефекта;
- 4) коэффициент изрезанности области второго типа (отношение периметра окружности к периметру области дефекта при равенстве их площадей) $K_3 = 4\pi \cdot S_0 / P_0^2$;
- 5) коэффициент отношения сторон ограничивающего прямоугольника $K_4 = a/b$, где a – ширина и b – высота прямоугольника.

2. **Статистические признаки сигнала.** Для получения данных признаков область дефекта разделяется на 9 ячеек. В качестве значений признаков берётся средний уровень сигнала в ячейке (рис. 4).

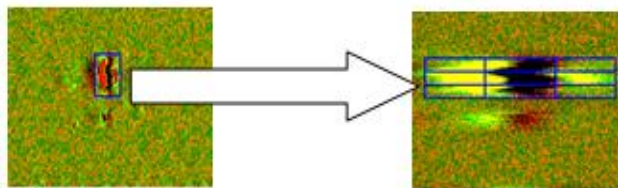


Рис. 4. Выделение ячеек в области дефекта

После вычисления классификационных признаков дефектной области, их значения передаются в блок распознавания дефектов, где с помощью искусственной нейронной сети (ИНС), представляющей собой четырёхслойный персептрон (один входной слой, два скрытых слоя и один выходной) происходит идентификация дефекта. Добавление двух внутренних слоёв позволило существенно повысить качество распознавания и снизить количество итераций обучения. Число нейронов в 1-3 слоях сети принято равным количеству входных признаков. Количество нейронов в выходном слое соответствует числу распознаваемых дефектов – по одному нейрону на дефект (рис. 5).

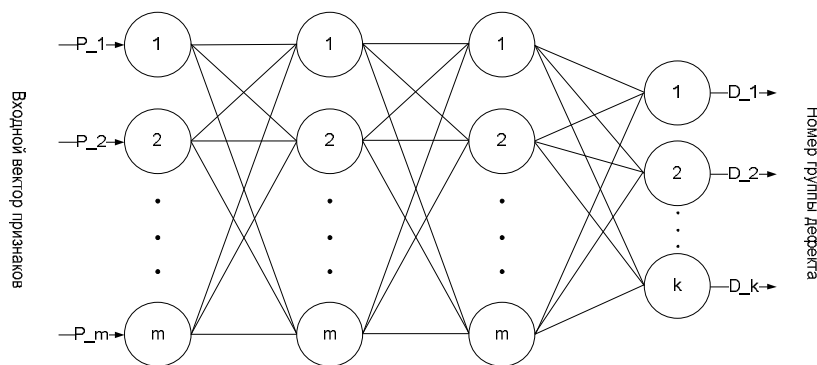


Рис. 5. Структура ИНС:
 P_1, \dots, P_m – входные признаки; D_1, \dots, D_k – распознаваемые дефекты

2. Анализ эффективности предлагаемой системы

Для анализа эффективности предлагаемой системы разработано программное обеспечение (ПО), пользовательский интерфейс которого представлен на рис. 6.

Обучение ИНС проводится по трём группам признаков:

- 1) признаков, полученных на основе обработки сканированного изображения поверхности колец подшипников;
- 2) статистических признаков сигнала ВТД;
- 3) совокупности статистических признаков сигнала ВТД и признаков, полученных на основе обработки сканированного изображения поверхности детали.
- 4) Для обучения использован алгоритм обратного распространения ошибки [8], обладающий относительной простотой реализации и достаточной эффективностью с точки зрения времени обучения.

После обучения ИНС выполнено её тестирование на данных, полученных с ОАО «Саратовский подшипниковый завод». В качестве распознаваемых дефектов выступали области неоднородности с уровнем сигнала выше и ниже среднего по детали, а также дефект типа «трещина» (рис. 7).

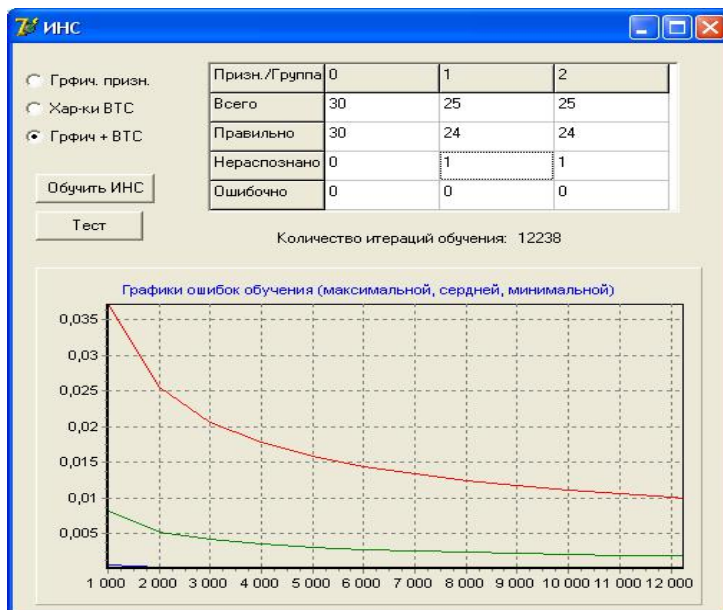


Рис. 6. Пользовательский интерфейс программного обеспечения

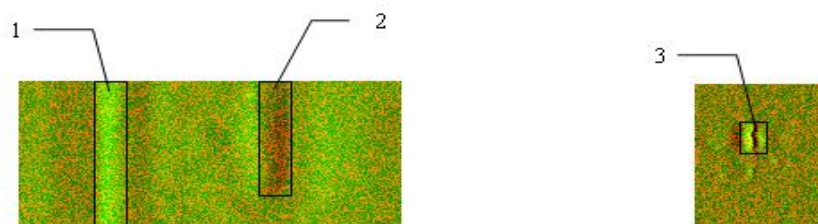


Рис. 7. Распознаваемые дефектные области:
1 - неоднородности с уровнем сигнала выше среднего; 2 - неоднородности с уровнем сигнала ниже среднего; 3 – дефект типа «трещина»

Полученные результаты анализа приведены в таблице. Как следует из таблицы, наилучшие результаты распознавания имеют место при использовании признаков, полученных на основе обработки сканированного изображения поверхности колец подшипников. Это объясняется тем, что эти признаки, в основном, используют только характеристики формы дефектной области.

Использование при распознавании статистических признаков сигнала ВТД позволяет получить несколько лучшие результаты, так как они характеризуют уровень сигнала в отдельных участках дефектных областей, что позволяет судить не только о характеристиках самого сигнала в выделенной ячейке, но и косвенно о форме дефектного участка.

Результаты эффективности распознавания дефектов

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее значение, %
Признаки, полученные на основе обработки сканированного изображения поверхности колец подшипников											
Не идентифицировано дефектов	5	12	7	4	6	7	3	6	7	4	7,6
Ошибочно распознано	2	0	4	4	0	0	2	2	3	1	2,3
Количество итераций обучения (тыс.)	111	23	60	143	19	53	83	120	57	37	70,6
Статистические признаки сигнала											
Не идентифицировано дефектов	5	8	3	4	0	6	3	11	6	6	6,50
Ошибочно распознано	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0,5
Количество итераций обучения (тыс.)	42	35	30	62	45	61	39	32	60	47	45,3
Совокупность признаков											
Не идентифицировано дефектов	2	3	3	1	0	1	1	5	5	3	3
Ошибочно распознано	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,1
Количество итераций обучения (тыс.)	24	18	9	9	16	14	15	22	16	15	15,8

Лучшие результаты достигаются при совместном использовании статистических признаков сигнала ВТД и признаков, полученных на основе обработки сканированного изображения поверхности колец подшипников. Применение совокупности данных признаков позволило снизить общий процент ошибок распознавания дефектов с 7-10 до 3-4%.

Заключение

По результатам проведённого эксперимента установлено, что совместное использование статистических признаков сигнала ВТД и признаков, полученных на основе обработки сканированного изображения поверхности колец подшипников, позволяет существенно улучшить качество распознавания дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорофеев А.Л. Электромагнитная дефектоскопия / А.Л. Дорофеев, Ю.Г. Казаманов. М.: Машиностроение, 1980. 280 с.
2. Герасимов В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В.Г. Герасимов, В.В. Клюев, В.Е. Шатерников. М.: Энергия, 1983. 217 с.
3. Кулаков Ю.М. Предотвращение дефектов при шлифовании / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков, И.В. Дунин-Барковский. М.: Машиностроение, 1975. 144 с.
4. Пчелинцев Д.О. Метод автоматического распознавания дефектов деталей подшипников на основе вихретоковой дефектоскопии с помощью вейвлет-преобразования / Д.О. Пчелинцев, С.А. Игнатъев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. №3(40). С. 70-77.
5. Игнатъев А.А. Автоматизация распознавания дефектов шлифованных деталей в системе мониторинга технологического процесса производства подшипников / А.А. Игнатъев, А.Р. Бахтеев // Вестник СГТУ. 2006. №3 (14). Вып.1. С. 136-142.
6. Рожков И.А Система нечеткого вывода для мониторинга поверхностного слоя деталей подшипников / И.А. Рожков, В.А. Иващенко // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов, 2010. С. 43-47.
7. Рожков И.А. Идентификация дефектов поверхностного слоя деталей подшипников с помощью искусственной нейронной сети / И.А. Рожков, В.А. Иващенко // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых. Саратов, 2010. Т. 1. С. 72-74.
8. Патрик Э. Основы теории распознавания образов / Э. Патрик. М.: Сов. радио, 1980. 408 с.

Рожков Игорь Александрович – аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Игнатъев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Иващенко Владимир Андреевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем точной механики и управления, г. Саратов

Rozhkov Igor Aleksandrovich – post-graduate student of the Department of «Automation and management of technological processes» of Saratov State Technical University

Ignatiev Aleksandr Anatolyevich – Doctor of technical sciences, professor, head. Department «Automation and management of technological processes» of Saratov State Technical University

Ivaschenko Vladimir Andreevich – doctor of technical sciences, the leading scientific employee, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov

Статья поступила в редакцию 16.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

Г.М. Садчикова

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ПРОИЗВОДСТВЕ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Автоматизация производственных процессов требует разработки новых методов измерения параметров технологических процессов и устройств на базе этих методов. Проведенный обзор систем управления технологическими процессами позволяет определить виды и характеристики измеряемых параметров.

Системы управления, резинотехнические изделия, измеряемые величины, автоматизация производственных процессов

G.M. Sadchikova

CONTROL SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN MANUFACTURE RUBBER TECHNICAL OF PRODUCTS

Automation of productions requires development of new methods of measurement of parameters of technological processes and devices on the basis of these methods. The lead review of control systems of technological processes allows to define kinds and characteristics of measured parameters.

Control systems, rubber technical the products, measured sizes, automation of productions

В настоящее время актуальна проблема комплексной механизации и автоматизации в резинотехнической промышленности. Это можно объяснить сложностью и высокой скоростью протекания технологических процессов. К датчикам, используемым при автоматизации производственных процессов в резинотехнической промышленности, предъявляется ряд требований, таких как быстродействие, высокая точность измерений, возможность работы в агрессивных средах, небольшие габариты и ряд других. В данной статье рассмотрены автоматизированные системы управления технологическими процессами, применяемые на ОАО «Балаково-резинотехника» и других предприятиях по производству резинотехнических изделий.

Адаптивная система управления процессом приготовления смесей на примере шинного производства [1]. Структура адаптивной системы управления показана на рис. 1. Задача данной системы управления состоит в стабилизации средних значений качества резин и резиновых смесей и уменьшении дисперсии значений свойств смесей в условиях замен компонентов смесей. Основное назначение блока прогноза компонентных доз – подбор пропорций ингредиентов в смесях при их заменах другими веществами. Дополнительными эффективными элементами системы управления являются базы прецедентов замен ингредиентов и синтезированных моделей технологических режимов: установлено, что длительность хранения прецедентов управления должна составлять не менее 3 лет. Разработанная система реализована при создании АСУТП приготовления резиновых смесей на ОАО «Ярославский шинный завод».

Система оптимального управления процессом изготовления резиновых смесей [2].

Задача текущего управления рассматриваемым объектом сводится к поочередному решению 2 задач: коррекции параметров математической модели процесса смешения по данным нормальной эксплуатации и определению на ее основе управляющих воздействий, позволяющих скомпенсировать реакцию на внешние возмущения



Рис. 1. Структура адаптивной системы управления

Управляющие воздействия в данном случае на промышленных резиносмесителях – это расход охлаждающей воды и время смешивания. Для управления процессом в режиме его нормальной эксплуатации автор выделяет 4 физико-механические характеристики: пластичность, эластичность по отскоку, модуль при 300% деформации, сопротивление разрыву. Выявлено, что наиболее существенные внешние возмущения связаны с качеством исходного сырья, погрешностью дозирования, уровнем квалификации работников.

Входными переменными (X) служат показатели качества основных ингредиентов состава каучуков. Поскольку результат действия внутренних и внешних возмущений в значительной степени отражается на однородности получаемой смеси, возникает необходимость ее оперативного контроля. В работе предлагается экспресс-метод определения однородности смеси на основе измерения удельного объемного электрического сопротивления ρ_v . С этой целью анализировалась зависимость ρ_v от различных ингредиентов состава, времени смешения, показателей качества сырой смеси и вулканизата. В итоге сделан вывод о целесообразности использования ρ_v в системе оперативного контроля и управления, так как это позволяет с точностью до $\pm 1,5\%$ оценивать однородность смеси, контролировать ее эластические свойства и момент введения сажи.

Управление реакционной способностью резиновой смеси производится путем корректировки дозировок ингредиентов влияющих на кинетику вулканизации: вулканизатор – сера молотая, ускоритель вулканизации – сульфенамид М, активатор вулканизации – белила цинковые.

Для построения математической модели по управляющим воздействиям проведена серия активных экспериментов. При этом производилось из-

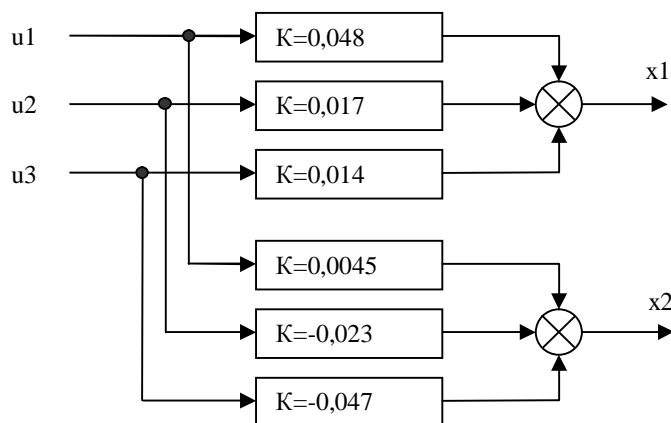


Рис. 2. Структурная схема объекта управления

менение дозровок данных компонентов и для полученных резиновых смесей исследовались кинетические кривые. Аппроксимация полученных кривых уравнениями кинетики позволила для каждого эксперимента получить оценки параметров модели и определить коэффициенты передачи каждого входного параметра на кинетические параметры резиновой смеси [3]. На рис. 2 представлена структурная схема объекта управления, где x_1 , x_2 обозначены максимальный момент и константа кинетики вулканизации, u_1 , u_2 , u_3 соответственно объем дозровок серы, сульфенамида и белил цинковых.

Периодичность отбора данных для системы управления равна одним суткам. Длительность приготовления партии резиновой смеси – двое суток. Таким образом, по управляющему воздействию имеется транспортное запаздывание, равное двум периодам опроса, что соответствует передаточной функции $W(p) = e^{-p\tau}$, где $\tau = 2$. Структурная схема системы управления приведена на рис. 3.

Математическое моделирование работы системы при подаче единичных возмущающих воздействий показало, что система обрабатывает их без остаточной ошибки. Система реализована на ОАО «Балаковорезинотехника».

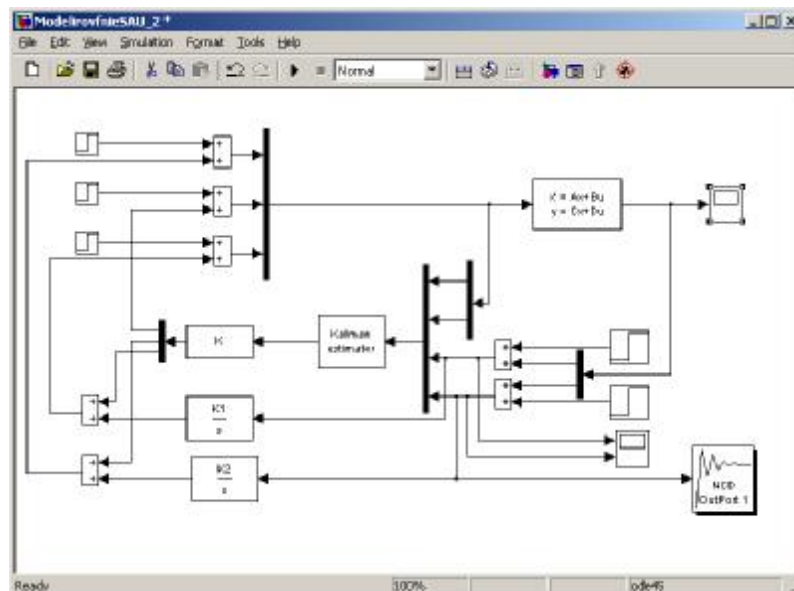


Рис. 3. Структурная схема системы управления характеристиками резиновой смеси

Система управления процессом получения вибродемпфирующих материалов (ВДМ). На основании анализа временных рядов характеристик ВДМ, которые выпускаются на ОАО «Балаковорезинотехника» сделан вывод о том, что существующее технологическое оборудование и структура материала могут обеспечить необходимые характеристики вибродемпфирования. Для этого технологическая линия должна быть оснащена рядом измерительных и исполнительных механизмов и введена многоконтурная система управления. Для уменьшения дисперсии качественных показателей ВДМ требуется стабилизация технологического процесса [4].

Для обеспечения управления концентрацией реакционной массы на выходе буферной ёмкости – смесителя необходим канал управления. В качестве канала управления предлагается – дозировка битума в непрерывный буферный смеситель. Уменьшение подачи битума в дискретные смесители, при дополнительной подаче битума в буферный смеситель позволит управлять консистенцией пульпы с помощью системы управления.

Система управления должна решать следующие задачи: дозирование компонентов смеси; управление длительностью смешения; контроль однородности смеси; управление плотностью смеси; стабилизация ККП на заданном уровне.

Структурная схема системы приведена на рис. 4. В основу работы системы управления заложена закономерность изменения мощности, потребляемой электрическим двигателем мешалки буферного смесителя и выгрузочного шнека в процессе приготовления партии битумной смеси. В качестве прибора для измерения активной мощности двигателей предлагается использовать частотно регулируемый преобразователь, одним из выходных аналоговых сигналов которого, является сигнал активной мощности. Кроме того, применение в системе инвертора решает задачу управления и скоростью перемешивания. Таким образом, предлагаемая каскадная система путем стабилизации активной мощности двигателя шнека на заданном уровне обеспечивают стабилизацию композитного коэффициента потерь.

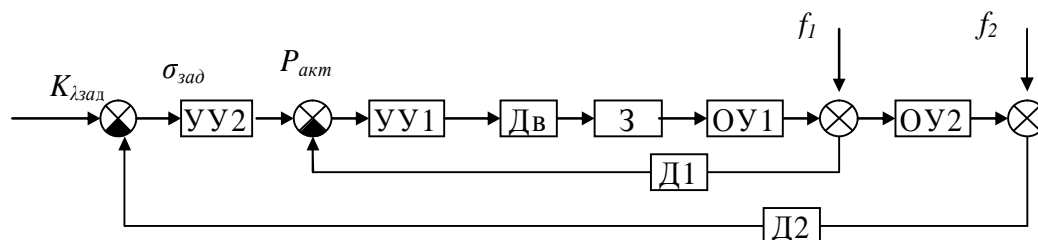


Рис. 4. Структурная схема получения вибродемпфирующего материала
 Элементы внутреннего контура: Д1 – датчик 1 ($P_{акт}$ инвертор); УУ1 – управляющее устройство 1;
 Дв – двигатель асинхронный; З – задвижка; ОУ1 – объект управления1.
 Элементы внешнего контура: Д2 – датчик 2 ($K_{л}$ лабораторный анализ); УУ2 – управляющее устройство2; СУ – система управления внутреннего контура; ОУ2 – объект управления 2

ЛИТЕРАТУРА

1. К вопросу автоматического управления процессом резиносмешения / В.А. Погонин, В.В. Удадьцов, Н.С. Попов и др. // Процессы и оборудование для изготовления резиновых смесей: сб. науч. тр. / под ред. В.А. Ключарева, Е.Г. Вострокнутова. ЦНИИТЭнефтехим. М.: 1997. С. 69-72.
2. Андрашников Б.И.. Справочник по автоматизации и механизации производства шин и РТИ / Б.И. Андрашников. М.: Химия. 1981. 296 с.
3. Сочнев А.Н. Повышение стабильности характеристик резинотехнических изделий методами управления / А.Н. Сочнев, Г.М. Садчикова, В.П. Бирюков // Каучук и резина. 2008. № 3. С. 46-49.
4. Бирюков В.П. Рассмотрение технологического процесса производства битумного вибродемпфирующего материала как объекта управления / В.П. Бирюков, А.А. Калюжный, Г.М. Садчикова // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. тр. Саратов, 2007. С. 13-18.

Садчикова Галина Михайловна – кандидат технических наук, докторант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Sadchikova Galina Mihajlovna – Candidate of Technical Sciences, doctoral candidate of the Department of «Automation and management of technological processes» of the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

Е.М. Самойлова, А.А. Игнатъев

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Рассматриваются возможности применения генетического алгоритма при проектировании интеллектуальных систем управления.

Искусственный интеллект, формообразование, генетический алгоритм
Е.М. Samoilova, A.A. Ignatyev

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF THE PROCESSES OF FORMATION USING GENETIC ALGORITHMS

The possibilities of genetic algorithm in designing intelligent control system.s.

Artificial Intelligence, shape, genetic algorithm

Неуклонное увеличение требований к информационным системам в современном производстве, в особенности при решении задач управления сложными многопараметрическими и сильносвязанными системами, объектами, производственными и технологическими процессами, где постоянно приходится сталкиваться с решением неформализуемых либо трудноформализуемых задач, вызывает все возрастающий интерес к искусственному интеллекту [3].

Основными направлениями разработки систем искусственного интеллекта принято считать: *машинный интеллект*, заключающийся в строгом задании результата функционирования за счет использования законов формальной логики, теории множеств, графов, семантических сетей и других достижений науки в области дискретных вычислений, и *искусственный разум*, направленный на моделирование внутренней структуры системы за счет математической интерпретации деятельности нервной системы во главе с мозгом человека, и реализуются в виде нейроподобных сетей на базе нейроподобного элемента – аналога нейрона и эволюционных вычислений, моделирующих интеллектуальное поведение на основе биологических элементов. При этом нейроподобные сети обладают уникальным свойством – работать даже при условии неполной информации об окружающей среде, то есть, как и человек, они на вопросы могут отвечать не только «да» и «нет», но и «не знаю точно, но скорее да».

Нейросети в последнее время являются одним из самых перспективных направлений в области искусственного интеллекта и постепенно входят в бытность людей в широком спектре деятельности как искусственный аналог биологической сети, по своим параметрам максимально приближающийся к оригиналу. Принято разбивать нейроподобные сети на несколько групп: сети обратного распространения ошибки, сети Хопфилда и др., которые используются для распознавания образов, анализа и синтеза речи, перевода с одного языка на другой и прогнозирования; системы управления в реальном времени несложных объектов, появление некоторых внутренних стимулов, возможностью к самообучению и функционированию в реальном времени; нейроподобные системы, нацеленные на создание виртуальных личностей – информационных копий человека [1].

При проектировании различных классов интеллектуальных систем одно из центральных мест занимают задачи оптимизации, что отражает естественное стремление к выбору наилучшей стратегии поведения в условиях неопределенности, к построению наиболее простого варианта

модели системы управления при соблюдении требований к качеству функционирования или нахождению оптимальных настроек параметров мониторинга многокомпонентной системы.

Применение традиционных алгоритмов многопараметрического поиска для решения подобных задач осложняется многими факторами, например:

- резкий рост вычислительных затрат и времени поиска при увеличении варьируемых параметров;
- необходимость вычисления на каждом шаге поиска производной целевой функции;
- низкая эффективность поиска при наличии «овражных» ситуаций и в окрестностях локальных экстремумов;
- низкая помехоустойчивость алгоритмов.

Подобные недостатки при поиске оптимальных решений успешно преодолеваются генетическими алгоритмами, основанными на генетических процессах биологических организмов: биологические популяции развиваются в течение нескольких поколений, подчиняясь законам естественного отбора и по принципу «выживает наиболее приспособленный» (survival of the fittest), открытому Чарльзом Дарвином. Подражая этому процессу, генетические алгоритмы способны «развивать» решения реальных задач, если те соответствующим образом закодированы, для того чтобы генерировать на каждом шаге алгоритма все более лучшие приближения к оптимальному решению.

Основные принципы ГА были сформулированы в докторских диссертациях Р.Холстиена и Де Енга, где на ряде примеров были впервые продемонстрированы возможности ГА для решения многопараметрической оптимизации [1].

В монографии Дж. Холланда «Адаптация в природных и искусственных системах» было дано теоретическое обоснование метода и сформулированы базовые принципы. В отличие от эволюции, происходящей в природе, ГА только моделируют те процессы в популяциях, которые являются существенными для развития. ГА работают с совокупностью «особей» – популяцией, каждая из которых представляет возможное решение данной проблемы. Каждая особь оценивается мерой ее «приспособленности» согласно тому, насколько «хорошо» соответствующее ей решение задачи. Наиболее приспособленные особи получают возможность «воспроизводить» потомство с помощью «перекрестного скрещивания» с другими особями популяции. Это приводит к появлению новых особей, которые сочетают в себе некоторые характеристики, наследуемые ими от родителей. Наименее приспособленные особи с меньшей вероятностью смогут воспроизвести потомков, так что те свойства, которыми они обладали, будут постепенно исчезать из популяции в процессе эволюции. Так и воспроизводится вся новая популяция допустимых решений, выбирая лучших представителей предыдущего поколения, скрещивая их и получая множество новых особей. Это новое поколение содержит более высокое соотношение характеристик, которыми обладают хорошие члены предыдущего поколения. Таким образом, из поколения в поколение хорошие характеристики распространяются по всей популяции. Скрещивание наиболее приспособленных особей приводит к тому, что исследуются наиболее перспективные участки пространства поиска. В конечном итоге популяция будет сходиться к оптимальному решению задачи (рис. 1). Имеется много способов реализации идеи биологической эволюции в рамках ГА [2].

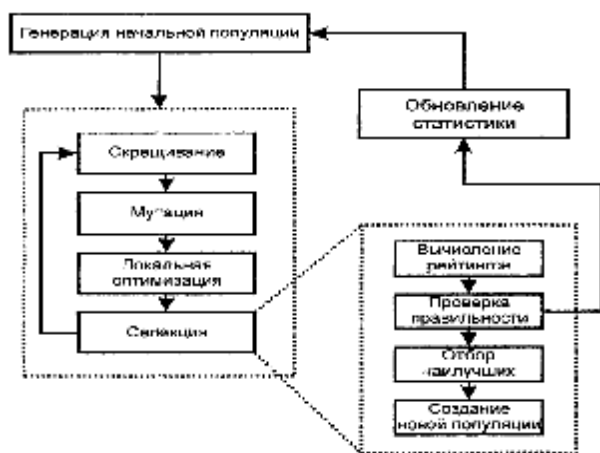


Рис. 1. Схема генетического алгоритма

В настоящее время под термином «генетические алгоритмы» скрывается не одна модель, а достаточно широкий класс алгоритмов, подчас мало похожих друг на друга, но объединенных основным преимуществом – возможностью применения на сложных задачах, где не существует никаких специальных методов. Даже там, где хорошо работают существующие методики, можно достигнуть улучшения сочетанием их с ГА. Цель в оптимизации с помощью ГА состоит в том, чтобы найти лучшее возможное решение или решение задачи по одному или нескольким критериям.

Например, целью задачи поиска является нахождение оптимальных параметров режимов обработки (резания) станочного оборудования.

Чаще всего этими параметрами являются: V – скорость, S – глубина резания и t – подача. Параметры технологического режима варьируются в диапазоне: частота вращения – в диапазоне 400 ... 1600 мин⁻¹, подача – в диапазоне 0.02 ... 0.1 мм/об, глубина резания – в диапазоне 0.1 ... 0.5 мм. Диапазоны допустимых значений параметров представляют собой пространство поиска. Пространство параметров поиска будет дискретным и представлять множество потенциальных решений.

В рамках данной задачи пространство поиска принимает вид: частота вращения – в диапазоне 400 ... 1600 мин⁻¹ с шагом 10 мин⁻¹, подача - в диапазоне 0.02 ... 0.1 мм/об с шагом 0.01 мм/об, глубина резания – в диапазоне 0.1 ... 0.5 мм с шагом 0.1мм.

Целевой функцией является:

$$F(V, S, t) = \min F(Ra, Wz, A) \quad (1)$$

где Ra – шероховатость, Wz – волнистость, A – отклонение от круглости.

Далее, применяя ГА, возможно построение интеллектуальной системы управления технологическим оборудованием машиностроительного производства (рис. 2) как самообучающейся, самонастраивающейся системы с гибкими процедурами принятия решений об управлении, как системы, основанной на знаниях и формирующей новые знания в процессе управления и функционирования.

В задачи интеллектуальной системы управления входят: экспертная оценка ситуации управления; синтез управляющих воздействий; анализ среды функционирования и т.д. Класс интеллектуальных систем управления соответствует следующим пяти принципам:

- наличие взаимодействия управляющей системы с реальным внешним миром с использованием информационных каналов связи; интеллектуальные системы управления получают из него знания и влияют на него. Выполнение этого принципа позволяет организовать канал связи для извлечения знаний и организации целесообразного поведения;

- принципиальная открытость системы с целью повышения интеллектуальности и совершенствования собственного поведения (открытость системы обеспечивается наличием самонастройки, самоорганизации и самообучения). Система знаний интеллектуальной системы управления состоит из двух частей: поступающие знания и проверенные знания. Этот принцип позволяет организовать пополнение и приобретение знаний;

- наличие механизмов прогноза изменений среды функционирования и собственного поведения системы в динамически меняющемся внешнем мире. В соответствии с этим принципом интеллектуальная система управления не полностью интеллектуальна, если она не обладает возможностью прогноза изменений внешнего мира и собственного поведения;

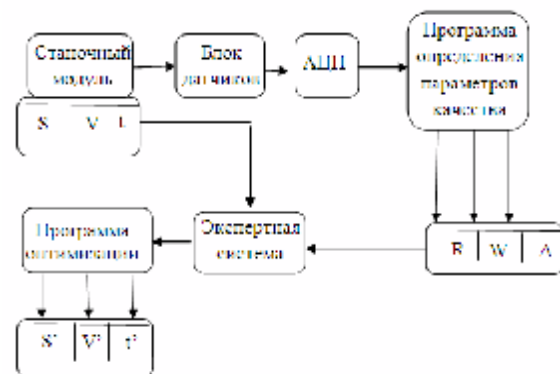


Рис. 2. Схема интеллектуальной системы управления станочным модулем

– наличие у системы структуры построения, соответствующей принципу IPDI (Increase of Precision with Decrease of Intelligence): точность управления тем выше, чем меньше интеллектуальность системы. Это путь построения сложных интеллектуальных систем управления в случае, когда неточность знаний о модели объекта управления или о его поведении может быть скомпенсирована за счет повышения интеллектуальности создаваемой системы;

– сохранение функционирования при разрыве связей или потере управляющих воздействий от вышестоящих уровней иерархии.

Интеллектуальная система управления базируется на информационной системе анализа функционирования технологического оборудования по параметрам качества формообразования с применением искусственных нейронных сетей, являющихся базой знаний системы и оптимизации управляющих воздействий (параметров режимов резания (v , S и t)) с использованием генетического алгоритма (ГА).

Система состоит из следующих функциональных блоков (рис. 2): информационной системы анализа функционирования технологического оборудования по параметрам качества формообразования с применением искусственных нейронных сетей. Она реализована в виде программы определения параметров качества; системы оптимизации управляющих воздействий на основе генетического алгоритма (на рисунке она представлена программой оптимизации) и экспертной системы.

Генетические алгоритмы не гарантируют и того, что глобальное решение будет найдено, но они хороши для поиска «достаточно хорошего» решения задачи «достаточно быстро».

Хотя модель эволюционного развития, применяемая в ГА, сильно упрощена по сравнению со своим природным аналогом, тем не менее ГА является достаточно мощным средством и может с успехом применяться для широкого класса прикладных задач не только класса традиционной оптимизации, но и управления сложными динамическими объектами в условиях неопределенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.
2. CETIM, 1985. La Surveillance Automatique des Outils de Couple. CETIM, Senlis, Paris.
3. Игнатьев А.А. Совершенствование управления качеством продукции на основе системы мониторинга с элементами искусственного интеллекта / А.А. Игнатьев, Е.М. Самойлова // Вестник СГТУ. 2009. № 3 (41). С. 207-209.
4. Самойлова Е.М. Интеграция искусственного интеллекта в автоматизированные системы управления и проектирование технологических процессов / Е.М. Самойлова, А.А. Игнатьев // Вестник СГТУ. 2010. № 2 (44). С. 117-119.

Самойлова Елена Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Игнатьев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Samoilova Elena Mihajlovna – Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of chair «Automation and management of technological processes» Saratov State Technical University

Ignatyev Alexander Anatolevich – Doctor of technical sciences, professor, Head of Department «Automation and management of technological processes» Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 29.04.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

К.С. Усакин, М.В. Виноградов

АНАЛОГО-ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА БАЛАНСИРОВКИ ШПИНДЕЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ТОКАРНОГО МОДУЛЯ

Предлагается способ повышения точности вращения шпинделей на аэростатических опорах путем динамической балансировки в двух плоскостях. Применение автоматизированного балансировочного устройства способствует при определенных условиях повышению качества обработки. Оптимизация алгоритма процесса балансировки в сочетании с аналого-цифровой системой позволяет оперативно решать задачу снижения виброактивности шпиндельного устройства в режиме реального времени.

Балансировка, шпиндель, аэростатические опоры, операционный усилитель, полосовой фильтр, алгоритм

K.S. Usakin, M.V. Vinogradov

ANALOG-DIGITAL SYSTEM OF BALANCING OF THE SPINDLE OF THE PRECISION TURNING MODULE

The way of increase of accuracy of rotation of spindles on aerostatic support by dynamic balancing in two planes is offered. Application of the automated balancing device promotes under certain conditions to processing improvement of quality. Optimization of algorithm of process of balancing in a combination to analogue-digital system allows to solve operatively a problem of decrease in level of vibrations spindle devices in a mode of real time.

Balancing, spindle, aerostatic support, the operational amplifier, the strip filter, algorithm

Одной из основных причин вибрации и, как следствие, ухудшения качества обработки поверхности детали на прецизионном токарном модуле является неуравновешенность шпиндельного узла (ШУ). Балансировка ШУ повышает стойкость деталей станка и инструмента в 5 раз [1]. ШУ металлообрабатывающего станка проходит этапы конструирования, изготовления и эксплуатации. Каждый из этих этапов может служить источником возникновения соответствующей составляющей неуравновешенности. Поэтому значения дисбаланса в каждой из плоскостей коррекции складываются из векторной суммы конструкционного, технологического и эксплуатационного дисбалансов.

При разработке деталей шпинделя особое внимание нужно уделять взаимной сбалансированности диаметрально располагаемых элементов: болтов, шпилек, стяжек и т.д. с тем, чтобы на стадии конструкторской проработки обеспечить наиболее полную сбалансированность шпинделя. Необходимо производить отстройку собственных частот резонирующих деталей путем изменения их формы или веса, повышать требования к точности изготовлений деталей и др. При наличии всевозможных лабиринтных, маслозащитных, регулировочных, компрессионных и других колец в зоне подшипников необходимо, чтобы торцы колец были перпендикулярны к оси вращения во избежание торцевых биений и перекосов. Необходимо производить расчет критических частот шпинделя путем изменения массы и формы деталей вывести их за рабочие обороты.

Основными причинами появления дисбаланса деталей являются как неточности их изготовления, так и неточная сборка узлов агрегата. Таким образом, конструктивный и тех-

нологический дисбалансы определяют первоначальную неуравновешенность шпинделя, которая, как правило, уравнивается однократно, например, на балансировочных станках перед началом эксплуатации и в дальнейшем ее влияние не учитывается. При последующей эксплуатации станков сбалансированное состояние шпинделя может быть существенно нарушено. Причины разбалансировки шпинделей в процессе эксплуатации весьма разнообразны. Сбалансированность шпинделя может измениться с течением времени из-за структурных превращений в материале, приводящих к изменению размеров и формы деталей. В процессе эксплуатации станков происходят упругие и температурные деформации конструктивных элементов из-за различия упругих свойств и коэффициентов теплового расширения, что вызывает изменение положения центра масс шпинделя. На шпиндель могут быть установлены сменные насадки, обладающие первоначальной неуравновешенностью либо вносящие неуравновешенность путем неточной установки их на шпинделе.

До эксплуатации машины с помощью балансировочных станков, измерительных стендов и других устройств можно уравновесить шпиндель так, чтобы он удовлетворял определенным требованиям. Однако через определенное время его динамическое состояние неизбежно ухудшится, поэтому исходя из условий эксплуатации, необходимо производить либо ручную добалансировку, либо применять автоматическое балансировочное устройство (АБУ).

Полное устранение дисбалансов практически неосуществимо, поэтому их стремятся уменьшить до допустимых значений, определяемых техническими, экономическими и санитарными требованиями к станку или технологическому процессу. На практике это достигается с помощью балансировочных станков и приборов, которые позволяют измерять дисбалансы, устранять их, а также определять остаточные дисбалансы. Уравнивание осуществляется путем точного распределения массы ШУ. Распределение массы осуществляют путем прибавления или устранения определенного количества материала с учётом установленных для коррекции положений. Это называется динамической балансировкой в двух плоскостях. Количество и угловое положение отдельных корректирующих масс определяют на основе результатов измерений механических колебаний опор шпинделя. Предварительную балансировку шпинделя перед установкой в токарный станок осуществляют на балансировочных станках. Однако при смене типоразмера заготовки и техобслуживании требуется дополнительная подбалансировка ШУ в сборе на месте эксплуатации (в т.н. полевых условиях). В этом случае ориентация дисбаланса определяется на основе измерений амплитуды механических колебаний, обуславливаемых устанавливаемой в разные положения пробной массой. Как правило, для этого необходимо произвести не менее шести пробных пусков – по три на каждую опору, вычисления осуществляются по методам трёх пусков: путем перестановки пробных грузов на 180° [4] или перестановкой пробных грузов на 120° [2].

Для упрощения сбора, обработки (вычисления массы и углов компенсирующих грузов), а также накопления информации целесообразно применить аналого-цифровую систему (для автоматизированной балансировки), состоящей из персональной ЭВМ, подключённой к станку через электронный блок сопряжения. Структурная схема балансировочной аппаратуры и ШУ станочного модуля показана на рис. 1.

Балансируемый шпиндель вращается на аэростатических опорах, к которым прикреплены пьезоэлектрические вибродатчики. Для выполнения условий двухплоскостной балансировки сигнал с датчиков сначала проходит через компенсатор взаимного влияния, собранный по классической схеме [3] на резисторах. Далее сигнал с датчиков сначала проходит через операционный усилитель и полосовой фильтр (настроенный на частоту вращения), а после оцифровываются АЦП, в качестве которого использован 10-разрядный DAC TLC 1549IP. В ЭВМ цифровой сигнал поступает через последовательный порт.

Применение ЭВМ позволило большую часть операций выполнять программным путём, в частности так был реализован цифровой интегратор, выделяющий искомый сигнал из

общего фона различных помех. Число итераций задано не жёстко, а автоматически подстраивается под скорость опросов АЦП (с привязкой на имеющийся в ЭВМ кварцевый таймер). Благодаря этому полученные даже в разных условиях амплитуды колебаний можно сравнивать между собой. Сущность алгоритма состоит в следующем. Сначала задаётся время интегрирования. За это время путём тестовых запусков определяется количество опросов, которое успевают сделать компьютер. Затем создается файл с таким же количеством пустых ячеек (массив переменных). Каждая ячейка имеет свой адрес, а файл открыт в режиме произвольного доступа, когда можно обратиться к любой ячейке для чтения или записи. Создаётся также пустая переменная для накопления суммы. При запуске интегратора каждое новое значение амплитуды добавляется в переменную суммы и одновременно записывается в одну из ячеек файла произвольного доступа. Перед записью в эту ячейку нового значения производится считывание старого значения и вычитание его из переменной суммы. Каждое новое значение амплитуды записывается в массив по принципу карусели.

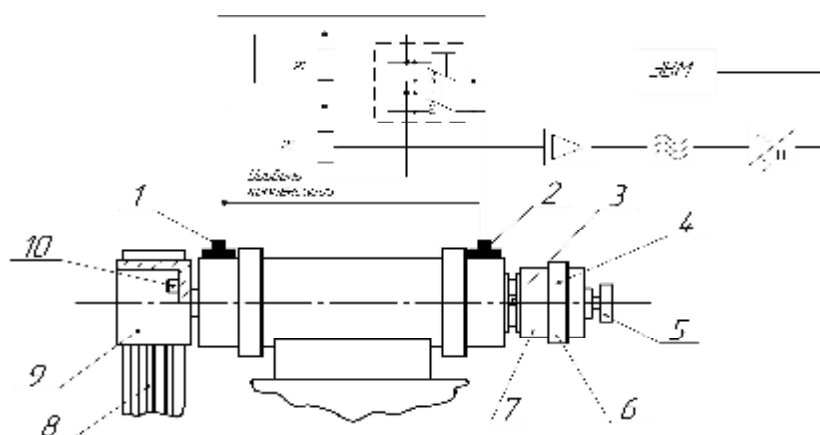


Рис. 1. Схема динамической балансировки ШУ модуля ТПАРМ-100М:
 1, 2 – вибродатчики; 3, 10 – балансировочные грузы;
 4, 6 – балансировочные кольца; 5 – деталь; 7 – патрон;
 8 – ременная передача; 9 – шкив

При поступлении нового значения не происходит суммирования всех переменных, а также нет последовательного смещения всех ячеек для освобождения места под новое значение (фактически меняется только адрес ячейки). Это позволило за каждый такт (каждое новое значение амплитуды) обходиться для интегрирования пятью операциями вместо нескольких тысяч, что очень важно при работе в реальном времени для экономии вычислительных ресурсов ЭВМ.

Результаты работы интегратора, полученные при испытаниях, иллюстрирует рис. 2. Для получения хорошей (очищенной от шумов) амплитуды требуется задать период интегрирования не более 1 с (в промышленном аппаратном интеграторе для получения такого же результата нужно не менее 10 с).

При наличии отметчика оборотов становится возможным использовать графический метод одновременного измерения амплитуд и фаз вибраций, как на рис. 2. При расчёте дисбалансов по методу перестановки пробных грузов на 180° результаты представляются в следующей форме:

Амплитуда колебаний неуравновешенного ротора, мкм..... $A1 = 0.48$
 Амплитуда колебаний с добавочным грузом (угол 0°), мкм..... $A2 = 1.22$
 Амплитуда колебаний с добавочным грузом (угол 180°), мкм..... $A3 = 1.16$
 Масса пробного груза, г..... $Mp = 1$
 Угол установки противовеса, $a = 95^\circ$ или 265°
 Масса добавочного груза, г $Md = 0.440$

Разработанная аналого-цифровая система балансировки и методы расчёта при экспериментальных исследованиях позволили вычислять угол дисбаланса с точностью $\pm 5^\circ$, что допускает их использование для определения дисбаланса шпинделя прецизионного токарного модуля.

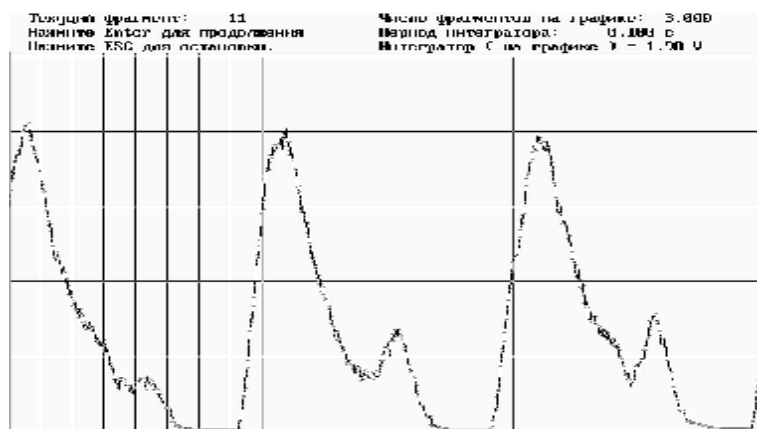


Рис. 2. Результат обработки на ЭВМ трёх оборотов шпинделя (деление по импульсам фотодатчика-отметчика оборотов, интегратор 0,1 с)

Была произведена количественная оценка влияния дисбаланса ШУ на точность обработки. Результаты экспериментального исследования модуля ТПАРМ-100М (установка пробных масс на шкиве и патроне) показали, что основным источником вибрации является динамически несбалансированный шпиндель (с патроном). После балансировки достигнуто снижение вибрации ШУ более чем в 3 раза, и как следствие этого, повысилась точность обработки деталей (сплав АК4Т) – некруглость уменьшилась в три раза (с 5-6 до 1-2 мкм), шероховатость $Ra = 0,1$ мкм улучшилась до $Ra = 0,08$ мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обзорная информация / ЦНИИТ ЭИприборостроения, 1983. ТС-7. Вып.5. 1-44.
2. Левит М.Е. Балансировка деталей и узлов / М.Е. Левит, В.М. Рыженков. М.: Машиностроение, 1986. 270 с.
3. Вибрации в технике: справочник в 6 т. Т.6. Защита от вибраций и ударов. 2-е изд., испр. и доп. / ред. совет: К.В. Фролов. М., 1995. 436 с.
4. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: учеб. для втузов / И.И. Артоболевский. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 640 с.

Усакин Кирилл Сергеевич – аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Виноградов Михаил Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Usakin Kirill Sergeevich – the post-graduate student of chair «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Vinogradov Michael Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of chair «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 29.04.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

Н.Н. Уткин, А.А. Игнатъев

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
ДЛЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ**

Рассматривается алгоритм дерева решений для определения динамического состояния шлифовального станка на основе виброакустических колебаний.

Дерево решений, шлифовальный станок, виброакустическое диагностирование

N.N. Utkin, A.A. Ignatyev

**MACHINE LEARNING METHODS USE FOR DYNAMIC SYSTEM VIBROACOUSTIC
DIAGNOSING OF THE GRINDING MACHINES**

An algorithm for decision tree to determine the dynamic state of a grinding machine based on vibro-acoustic oscillations.

Decision tree, grinding machine, vibro-acoustic diagnosis

Динамическая система (ДС) металлорежущего станка представляет собой совокупность четырёх компонентов: станок, приспособление, инструмент, деталь. ДС является замкнутой. Динамика станка определяется такими процессами, как резание, трение, тепловые процессы, электромагнитные, гидродинамические и ряд других [1].

В результате длительной эксплуатации станка в ДС возникают изменения различного характера, которые ухудшают показатели динамического качества станка и, как следствие, обрабатываемые детали не соответствуют заданной точности геометрических размеров и качеству поверхности. Одним из показателей ухудшения динамического качества станка является повышение уровня виброакустических (ВА) колебаний. Таким образом, мониторинг динамической системы по ВА колебаниям позволяет определить момент ухудшения динамического качества станка.

Вопросы оценки динамического состояния шлифовальных станков рассматривались в ряде работ [2, 3]. Оценка динамических характеристик шлифовальных станков предназначена для анализа текущего технического состояния станка и предотвращения технологических режимов обработки, при которых повышается уровень ВА колебаний и, как следствие, ухудшается качество шлифованной поверхности изделий.

Мониторинг технологического процесса (ТП) изготовления деталей подшипников позволяет предотвратить производство бракованных изделий. Для оценки качества шлифования используются показатели качества: геометрические (шероховатость, волнистость, отклонения формы) и физико-механические (прижоги, трещины, микроструктура, внутренние напряжения). Оценка этих показателей позволяет судить о качестве изделия. Для мониторинга используются средства активного контроля [4] и приборы вихретокового контроля [5]. Измеренные параметры используются человеком-экспертом для определения характеристик ТП изготовления деталей подшипников. Существует необходимость автоматизации экспертной деятельности. В данной статье рассматриваются вопросы архитектурной и алгоритмической реализации интеллектуальной информационной системы (ИИС), позволяющей автоматизировать деятельность человека-эксперта. Первой задачей, которую необходимо решить, явля-

ется разработка общей информационной модели ИИС. Информационная модель позволяет определить, как представлена, обрабатывается и хранится информация. В соответствии с современными достижениями, разработана информационная модель ИИС, в которой представление, обработка и хранение информации осуществляются декларативно (рис. 1). Особенностью этой информационной модели является то, что информация на всех уровнях иерархически структурирована в декларативной форме. В качестве декларативного языка используется язык XML [6]. ИИС имеет модульную архитектуру и состоит из следующих модулей: модуль получения и предварительного анализа информации; модуль сравнения реального и идеального сигналов; модуль базы данных и базы знаний.

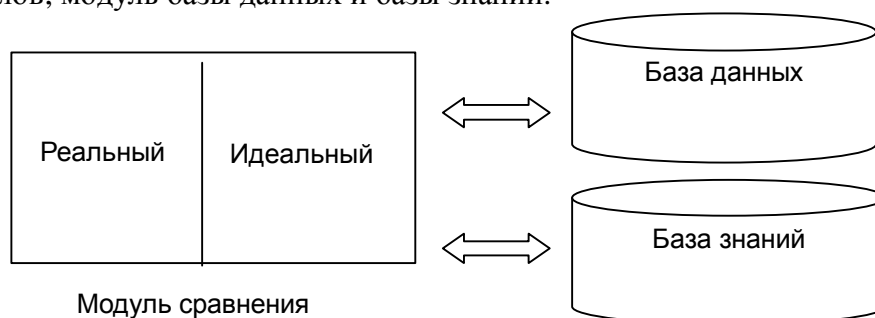


Рис. 1. Информационная модель интеллектуальной информационной системы

В модуле сравнения выполняется инкрементное сравнение каждого уровня иерархической структуры на предмет отклонения от нормы и в зависимости от результата сравнения осуществляется запись в одну из баз. Модуль сравнения является ядром ИИС так как здесь реализуются механизмы машинного обучения.

В данной информационной модели предлагается запись информации о состоянии динамической системы станков в XML базу данных, а информацию об отклонениях в XML базу знаний.

При этом методе обработки и хранения данных ускоряется процесс работы с базами и уменьшается избыточность данных. Для наглядности рассмотрим алгоритм обработки информации (рис. 2).

При этом база данных и база знаний представлена последовательностью состояний (XML файлом). Это унифицирует процесс обмена информацией, поскольку представление сигнала остаётся неизменным от узла до базы данных или базы знаний.

Рассмотрим модуль сравнения ИИС. Модуль сравнения необходим для осуществления задачи классификации. На входе классификатора имеется 4 дискриминанта (атрибута): общий уровень вибрации (ОУВ) на опоре кольца, ОУВ на частоте вращения шпинделя круга, ОУВ на шпиндельном узле (ШУ) круга, ОУВ на ШУ детали. Вначале необходимо определить результаты различных совокупностей дискриминантов. Эта задача выполняется человеком – экспертом, который формирует статистическую таблицу, результатом которой является рекомендация по устранению неисправности или наладке (таблица). Это метод обучения с учителем, где дано обучающее множество.

Обучающее множество часто представляется как экземпляр мультимножества. Экземпляр мультимножества – это коллекция кортежей. Каждый кортеж описывается вектором значений его атрибутов. Схема мультимножества даёт описание атрибутов и их значений и обозначается как $B(A, U, Y)$, где A обозначает множество входных атрибутов: $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, а Y представляет класс. После проверки по всем атрибутам на выходе получаем класс, к которому принадлежит совокупность состояний по каждому параметру. Атрибуты в данном случае имеют числовой тип. Область значений каждого атрибута определяется как $dom(a_i) = \{v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,|dom(a_i)|}\}$, где $|dom(a_i)|$ определяет конечную мощность множества. Таким же образом $dom(y) = \{c_1, c_2, \dots, c_{|dom(y)|}\}$.

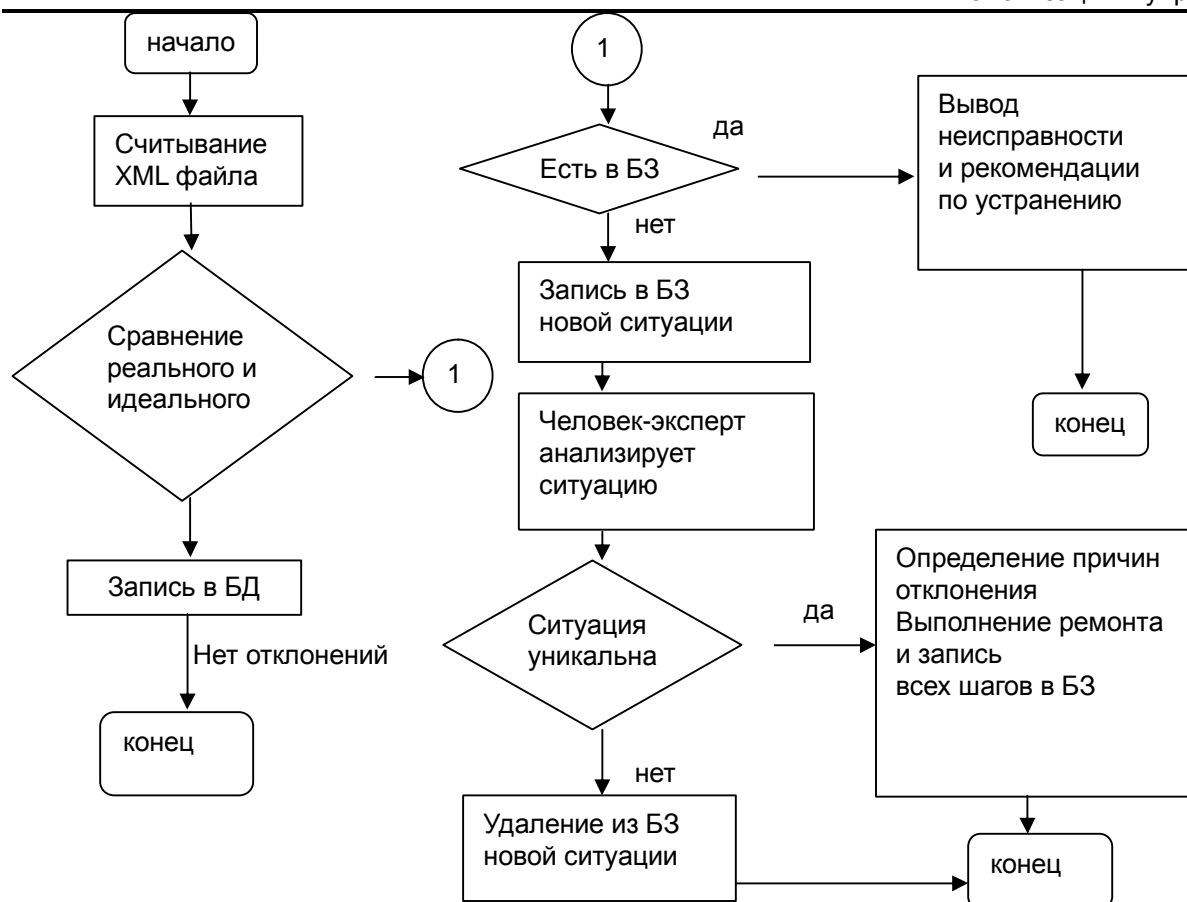


Рис. 2. Алгоритм обработки информации в ИИС

Множество всех возможных совокупностей определяется как произведение всех входных областей атрибутов: $X = dom(a_1) * dom(a_2) * ... * dom(a_n)$.

Как уже упоминалось, обучающее множество – это экземпляр мультимножества, состоящий из множества m кортежей. Формально обучающее множество обозначается как $S(B) = (\langle x_1, y_1 \rangle, \dots, \langle x_m, y_m \rangle)$ где $x_q \in X$, и $y_q \in dom(y)$.

Номер станка	Уровень вибраций, усл. ед.				Рекомендации
	Опора кольца ОУВ		ОУВ		
	ОУВ	ВЧВ	ШУ круга	ШУ детали	
166	2500	300	4300	7,8	Балансировка ШУ круга. Ремонт ШУ детали
436	2000	60	3500	2800	-
438	2200	70	4200	3000	Ремонт ШУ детали
230	700	45	420	900	-
105	2000	65	800	2800	-
106	2200	120	3200	2700	Балансировка ШУ круга. Ремонт ШУ детали
241	300	10	270	600	ЭТАЛОН

Примечание:

- 1 усл. ед. = 10^{-3} мс^2 ,
- ОУВ – общий уровень вибраций,
- ВЧВ – уровень вибраций на частоте вращения шпинделя круга,
- ШУ – шпиндельный узел.

На основе $S(B)$ после анализа человеком – экспертом определяются эталонные атрибуты. В соответствии с таблицей $a_1=300, a_2=10, a_3=270, a_4=600$. Для каждого атрибута

устанавливается 5 % отклонение. Строится иерархическое дерево решений, каждый уровень дерева выполняет проверку атрибута на отклонение от эталонных значений, если есть отклонение (+), проверка переносится в правое ответвление дерева, если нет отклонений (-), проверка переносится в левое ответвление дерева (рис. 3).

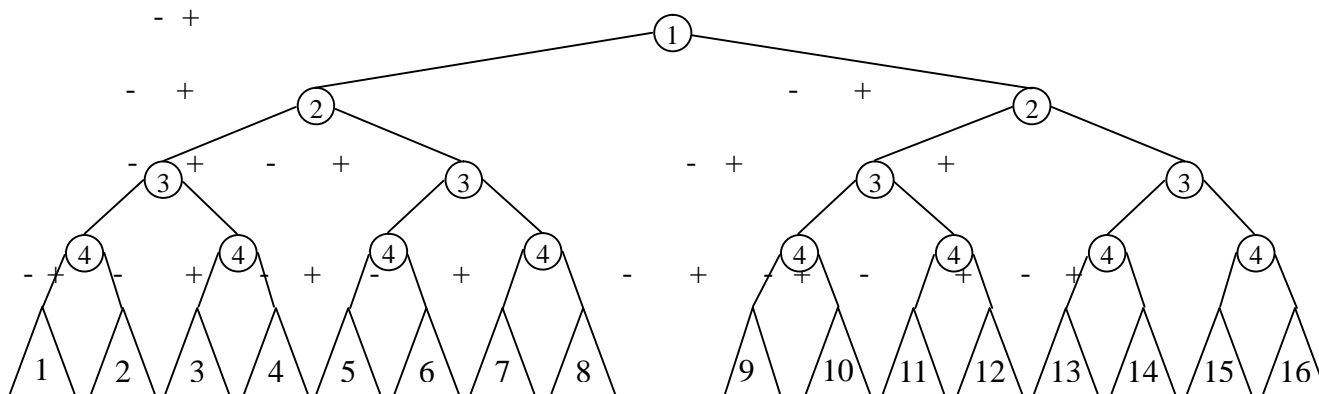


Рис. 3. Дерево решений

Ветви дерева заканчиваются целевым узлом в виде треугольника. Целевые узлы определяют рекомендации, необходимые для улучшения динамического качества шлифовального станка. В случае узла 1 отклонений в атрибутах нет, следовательно, никаких действий по наладке и ремонту станка не требуется. В случае узла 16 требуется выполнить комплекс мероприятий, таких как балансировка ШУ круга, ремонт ШУ детали и т.д.

Рассмотренный алгоритм позволяет автоматизировать задачу классификации состояний динамической системы шлифовальных станков. После обучения алгоритм корректно выполняет классификацию по всем атрибутам: ОУВ вибрации на опоре кольца, ОУВ на частоте вращения шпинделя круга, ОУВ на ШУ круга, ОУВ на ШУ детали. При наличии на входе программы множества состояний динамической системы шлифовального станка, на выходе получаем рекомендации по выполнению профилактических мероприятий по улучшению динамического качества шлифовального станка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. М.: Машиностроение, 1987. 360 с.
2. Мониторинг станков и процессов шлифования в подшипниковом производстве / А.А. Игнатъев, М.В. Виноградов, В.В. Горбунов, В.А. Добряков, С.А. Игнатъев. Саратов: СГТУ, 2004. 124 с.
3. Динамический мониторинг технологического оборудования / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, И.Н. Янкин, М.Б. Бровкова. Саратов: СГТУ, 2008. 312 с.
4. Игнатъев А.А. Активный контроль и мониторинг процесса шлифования деталей подшипников: монография / А.А. Игнатъев, В.В. Горбунов, С.А. Игнатъев. Саратов: СГТУ, 2007. 104 с.
5. Игнатъев А.А. Автоматизированная вихретоковая дефектоскопия деталей подшипников / А.А. Игнатъев, А.М. Чистяков, В.В. Горбунов // СТИН. 2002. №4. С. 17-19.
6. Уткин Н.Н. Модель системы виброакустического диагностирования динамической системы шлифовальных станков / Н.Н. Уткин, А.А. Игнатъев // Инновации и актуальные проблемы техники и технологий: материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных: в 2 т. Т. 1 / под общ. ред. А.А. Большакова. Саратов: СГТУ, 2010. С. 190-192.

Уткин Николай Николаевич – аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Utkin Nikolaj Nikolaevich – the post-graduate student of chair «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Игнатьев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Ignatyev Aleksandr Anatolyevich – doctor of technical sciences, professor, head of Department «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 04.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

ЭКОНОМИКА

УДК 336.1

Л.И. Романова, Г.Р. Шамьенова

ПЕРСПЕКТИВЫ КАДРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ РОССИИ

Выявлены тенденции в динамике изменения показателей уровня инновационного развития федеральных органов РФ и показателей эффективности подготовки кадров для инновационного производства.

Инновационное развитие, инновационная инфраструктура, образовательный кластер, кадровый потенциал, регионы России

L.I. Romanova, G.R. Shamjenova

PROSPECTS PERSONNEL POTENTIAL OF INNOVATIVE DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN REGIONS

The authors has found certain tendencies in the change dynamics of characteristics of the innovative development level of the regions of the Russian Federation and characteristics of personnel training efficiency for innovative production.

Innovative development, innovative infrastructure, educational cluster, personnel potential, regions of Russia

На современном этапе развития российской экономики большое внимание уделяется переходу от сырьевой модели к модели инновационного типа, базирующейся на высокотехнологичных отраслях. На основе имеющегося научно-технического потенциала формируется инновационная среда с учетом местных особенностей и реализуются положения региональной научно-технической политики.

Важными факторами, определяющими инновационный потенциал развития регионов, являются:

- существование на территории научно-производственного и образовательного комплексов, имеющих возможности для разработки современных наукоемких технологий;
- наличие на территории промышленных предприятий, способных воспринимать наукоемкие технологии и выпускать конкурентоспособную высокотехнологичную продукцию;
- размещение на территории региона потенциальных потребителей наукоемких технологий.

Наблюдается неравномерность размещения данных факторов по регионам страны, поэтому наиболее важно использовать механизм целевого экономического развития, который заложен в формировании региональной системы подготовки кадров.

Одной из характеристик инновационного развития являются показатели уровня инновационного потенциала федеральных округов РФ (табл. 1). Увеличение роста этих показателей представляет собой важную цель как государственного управления, так и социально-экономического развития страны и ее регионов.

Авторами особое внимание было уделено показателям ПФО, так как он является одним из ведущих в стране по уровню инновационного развития и обладает значительным инвестиционным вкладом до 35,6 млн долларов. Из таблицы видно, что инновационной деятельностью в ПФО занимаются 532 организации, что составляет 15% от общего их числа по России. Численность персонала, занятого исследованиями и разработками в ПФО, – 117,0 тыс. чел., или 15%. Численность исследователей с учеными степенями – 6,3 тыс. чел., что составляет 8,2%.

Региональная система подготовки кадров создает благоприятную внешнюю среду и формирует внутренние стимулы для экономического роста региона путем технологической модернизации традиционных производств и развития отраслей новой экономики. Формирование региональной системы подготовки кадров основано на взаимодействии государства, образования и науки с инновационной системой [2].

Таблица 1

Показатели уровня развития инновационного потенциала федеральных округов РФ за 2009 год [1]

Показатели	РФ	Центральный ФО	Северо- Западный ФО	Южный ФО	Приволжский ФО	Уральский ФО	Сибирский ФО	Дальнево- сточный ФО
Число организаций, выполняющих научные исследования и разработки, ед.	3536	1383	518	316	532	211	410	166
Численность персонала, занятого исследованиями и разработками, тыс. чел.	742,4	385,4	97,6	33,7	117,0	42,3	53,5	12,9
Численность исследователей с учеными степенями, тыс. чел.	76,0	42,4	10,7	3,8	6,3	2,7	7,8	2,4

Становление региональной системы подготовки кадров – это создание регионального образовательного кластера, способного на основе интеграции образования, науки и инновационной деятельности обеспечить региону эффективную конкурентоспособность на рынке.

При этом инновации в региональной системе подготовки кадров приобретают самовоспроизводящийся характер, когда взаимодействие между участниками выступает как ресурс инновационного развития, связанного с непрерывным обменом информацией, знаниями, опытом. Важным обстоятельством является то, что вновь созданные инновационные проекты становятся продуктом творчества и инициативы научных коллективов [3].

В процессе функционирования системы подготовки кадров для инновационного производства, должны быть достигнуты следующие цели:

1. Обеспечение информационной поддержки образовательного процесса, научной, инновационной и методической работы педагогического сообщества.
2. Повышение эффективности использования образовательных ресурсов.
3. Обеспечение равных возможностей пользования ресурсами всех субъектов образовательного процесса, научно-методической деятельности, осуществляемой в рамках регионального взаимодействия.
4. Расширение возможностей повышения квалификации работников в соответствии с потребностями развивающегося производства.

5. Объединение усилий образовательных учреждений, государства и бизнеса по использованию в своей деятельности современных информационных технологий.

6. Повышение эффективности инновационных технологий за счет взаимодействия образовательных учреждений и производства.

Эти цели могут быть достигнуты благодаря созданию необходимых условий функционирования образовательного кластера:

- формирование современных предприятий и институтов инновационной деятельности, способных стать источником обновления регионального хозяйственного комплекса;

- создание на базе отраслевых научно-исследовательских институтов инновационных предприятий и формирование рынка научно-технической продукции;

- соответствие научных разработок потребностям экономики с целью привлечения инвестиций из разных источников;

- формирование территориальных научно-промышленных единиц – (научных учреждений и промышленных предприятий), взаимосвязанных между собой совместной разработкой, испытанием и производством разных видов инновационной продукции.

Мобильность и гибкость региональной системы подготовки кадров, ее ориентация на индивидуальные образовательные запросы производства, позволяют обучаемым овладевать новыми профессиональными навыками, что, в конечном итоге, позитивно влияет на качество трудовых ресурсов [4].

Разработка критериев, позволяющих оценивать эффективность региональной системы подготовки кадров, необходима для оценки инновационного производства, уровня освоения новых образовательных технологий и качества образования (табл. 2, составлена авторами).

Таблица 2

Индикаторы эффективности региональной системы подготовки кадров для инновационного производства

<i>Целевой критерий</i>	<i>Индикаторы</i>
Профессиональный	Профессиональный рост работников производства Наличие образовательных программ повышения квалификации и перспективных инновационных проектов Расширение количества преподавателей, осваивающих передовые технологии обучения
Управленческий	Наличие системы управления знаниями и обмена опытом
Финансовый	Уровень дохода у молодых специалистов, занимающихся новыми технологиями Развитие проектного финансирования инновационных предприятий
Информационный	Наличие информационного ресурса (сайта) Наличие архивов, открытых для использования и системы обмена ресурсами (научными, методическими, информационными)
Пространственный	Увеличение охваченных системой учреждений и организаций Рост участников инновационного производства Расширение географии инновационного производства

В регионах формируются национальные исследовательские центры с инфраструктурой поддержки инновационной деятельности, включающей: технико-внедренческие особые экономические зоны, предусматривающие значительные льготы инновационным компаниям, технопаркам, бизнес-инкубаторам при вузах, центрам трансфера технологий, центрам коллективного пользования уникальным оборудованием. На конкурсной основе создаются и развиваются инновационные кластеры и наукограды. Положено начало новой российской

«территории инноваций» в подмосковном Сколково, где создается беспрецедентный правовой режим, сводящий к минимуму административные барьеры и налоговое бремя для компаний-участников.

Центр Сколково обеспечивает создание благоприятной для инновационной деятельности среды (институциональной, интеллектуальной, природной, условий проживания и проведения досуга). На сравнительно небольшой территории будет обеспечено сосредоточение исследовательского, научного и инновационного потенциалов, необходимых для генерирования новых идей, создания новых продуктов, технологий, продвижения фундаментальных и прикладных исследований [5].

Подготовка кадров, способных эффективно руководить инновационными процессами, разрабатывать и внедрять высокотехнологичные проекты, является приоритетным направлением деятельности вузов и предприятий регионов России.

В Саратовской области инновационная инфраструктура представлена технопарками при четырех ведущих вузах (СГУ, СГТУ, СГСЭУ и СГАУ) в г. Саратове, инновационно-технологическими, информационными, контактными центрами, сетью бизнес-инкубаторов, фондами – венчурным, гарантийным и микрокредитования.

Модернизация кадрового потенциала регионов России предусматривает расширение и создание новых механизмов привлечения и закрепления в науке и инновационных производствах молодых специалистов, предоставления им грантов, займов и венчурное финансирование. Необходима поддержка для организации новых лабораторий, стажировок молодых исследователей в ведущих российских и зарубежных университетах и научных центрах.

Основные направления политики повышения качества кадрового потенциала регионов отражены в Государственной федеральной целевой программе «Научные научно-педагогические кадры инновационной России», которая реализуется в настоящее время (срок завершения 2013 год). Программа предусматривает в кратчайшие сроки установить тесные связи образовательной сферы фундаментальной и отраслевой науки с промышленностью и реализовать стратегию инновационного развития на период до 2020 года.

Анализируя показатели уровня развития инновационного потенциала федеральных округов РФ за 2009 год, мы выявили, что ПФО имеет значительный вклад в инновационное развитие и по сравнению с другими округами занимает лидирующее положение.

Составленные авторами индикаторы эффективности региональной системы подготовки кадров для инновационного производства могут быть использованы в секторе науки и высшего профессионального образования, демонстрируют важную роль кадрового потенциала в формировании и управлении инновационным потенциалом развития регионов, а также формировании инфраструктуры инновационного общества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Регионы России. Социально-экономические показатели. М.: Росстат, 2010. 180 с.
2. Щетинин В.П. Человеческий капитал и неоднозначность его трактовки / В.П. Щетинин // МЭиМО. 2010. №2. С. 42-49.
3. Ложко В.В. Стратегические инновационные приоритеты региональной экономической политики / В.В. Ложко // Экономика и управление. №2(34). 2008. С. 55-58.
4. Ваганова О.В. Интенсификация инновационного производства: метод. аспекты: монография / О.В.Ваганова. Белгород: КОНСТАНТА, 2011. 298 с.
5. Проект Инновационная Россия – 2020 (Стратегия инновационного развития РФ на период до 2020). М.: Минэкономразвития России, 2010. 160 с.

Романова Людмила Игоревна – аспирант кафедры «Национальная экономика и экономическая теория» Саратовского государственного университета им.Н.Г.Чернышевского

Romanova Lyudmila Igorevna – Post-graduate student of pulpit «National economy and economic theory» Saratov State University by it. N.G.Chernishevsky

Шамьенова Галия Рушановна – кандидат филологических наук, начальник Управления информации и связей с общественностью Саратовского государственного технического университета

Shamjenova Galia Rushanovna – candidate of philological sciences, chief of information and relationship Governing with public of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 23.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК СГТУ»

1. Статья должна быть тщательно отредактирована и представлена в одном экземпляре, распечатанном через 1 интервал на белой бумаге форматом А4, поля: верхнее, нижнее, левое, правое – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12. Одновременно текст статьи представляется на дискете (1,44 Мбайт) в формате текстового редактора «MS Word 97» или по электронной почте vestnik@sstu.ru.

2. Статья должна обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать четкие выводы.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов,
- полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные),
- краткая (5-7 строк) аннотация (курсив).

Далее авторы, название статьи и аннотация повторяются на английском языке.

Затем идет текст самой статьи и литература.

Статья завершается сведениями об авторах: ф.и.о. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий; объем обзора – 25 страниц, 10 рисунков; объем краткого сообщения – не более 3 страниц, 2 рисунков.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, psc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров «Excel», «Quattro Pro», «MS Graph». Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул MS Word. Каждая формула должна иметь номер.

6. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

7. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.1-2003 и включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

8. Специалисты в технических отраслях к статье прилагают экспертное заключение.

9. Рукописи статей представляются в редакцию с рецензией ведущего ученого в данной области, как правило, доктора наук.

10. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

11. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи и дискеты авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.

12. Для публикации и своевременной подготовки журнала необходимо заполнить регистрационную карту участника, представляемую на отдельном бумажном носителе и в электронном виде.