

ВЕСТНИК
САРАТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
2011

№ 3 (58)
Выпуск 2

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.
Выходит один раз в квартал
Сентябрь 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. Плева
Зам. главного редактора	д.т.н., профессор А.А. Сытник
Ответственный секретарь	д.т.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. Игнатъев, д.т.н. В.В. Калашников, д.т.н. И.А. Новаков, д.и.н. И.Р. Плева (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. Ян Аврейцевич (Польша), д.э.н. У. Арнольд (Германия), д.ф.-м.н. Э. Мерсер (Великобритания), д.э.н. Э.де Соузе Феррейра (Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов.

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

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)
E-mail: vestnik @ sstu. ru
<http://dni. sstu. ru/vestnik.nsf>
Факс: (845 2)

Подписано в печать 25.09.11
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. Уч.-изд. л. 29,86
Тираж 500 экз. Заказ 134
Отпечатано в Издательстве СГТУ,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Подписной индекс 18378
(каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2012 г.)

ISSN 1999-8341

© Саратовский государственный
технический университет, 2011

**VESTNIK
SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY
2011**

**№ 3 (58)
Edition 2**

Scientific Journal

Since 2003
Once in a quarter
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

Doctor of Historical Sciences, Pr.I.R. Pleve

Editor-in-chief assistant

Doctor of Historical Sciences, A.A. Sytnik

Executive secretary

Doctor of Historical Sciences, V.V.Astahov

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

Editorial board: Pr. K.P. Andreychenko, Pr. Y.S. Arkhangelsky, Pr. A.S. Borshov, Pr. A.S. Denisov, Pr. Y.G. Ivashenko, Pr. Y.N. Klimochkin, Pr. V.A. Kolomeitsev, Pr. A.V. Korolyov, Pr. V.A. Krysko, Pr. V.I. Lysak, Pr. V.N. Lyasnikov, Pr. A.I. Finaenov, Pr. A.Y. Slepukhin, Pr. M.A. Sherbakov.

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

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054
Russia
Telephone: +8452/52-74-02
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. Acc.-pbl. l.
Edition 500 psc. Order 134
Printed in EPC of SSTU,
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

ISBN 1999-8341

© Saratov State Technical University, 2011

Содержание

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Белов А.П., Бочкарёв П.Ю. Выбор рационального технологического процесса в условиях многономенклатурного производства на основе конструктивных связей.....	10
Бокова Л.Г., Бочкарев П.Ю. Разработка метода оценки производственной технологичности деталей для условий многономенклатурного производства.....	13
Бочкарев А.П. Совершенствование метода обработки полых тел сферической формы.....	19
Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Зинина Е.П., Стариннова В.О. Исходные предпосылки для экспериментального исследования процесса плазменной модификации рабочей части режущего инструмента.....	22
Гребенников С.А., Гребенников А.С., Федоров Д.В. Неравномерность технического состояния элементов механизма газораспределения двигателя внутреннего сгорания.....	28
Ермольчева Н.В., Королев А.В., Орлов Б.С., Родионов И.В. О влиянии основных факторов дискретного вибрационного резания на объемные характеристики микрорельефа поверхности.....	35
Ермольчева Н.В., Королев А.В., Орлов Б.С., Родионов И.В. О влиянии конструктивных элементов устройства для дискретного вибрационного резания на форму и параметры микрорельефа поверхности.....	38
Денисов А.С., Тугушев Б.Ф., Горшенина Е.Ю. Анализ напряжений второго рода в колечатом вале, восстановленном наплавленными металлопокрытиями.....	43
Денисов А.С., Асоян А.Р., Юдин В.М. Повышение долговечности шатунных подшипников двигателя, КАМАЗ путем совершенствования технологии ремонта шатунов.....	50
Игнатъев А.А., Каракозова В.А. Определение допустимой подачи шлифовального круга по запасу устойчивости динамической системы для выбора режима обработки и учета в системе мониторинга.....	55
Игнатъев А.А., Коновалов В.В., Соколова Т. Экспериментально-аналитическое определение передаточной функции динамической системы токарного станка при резании.....	61
Иванов А.А., Бочкарев П.Ю. Обзор правил назначения приоритета операциям при реализации тп в механообрабатывающем производстве.....	66
Козлов Д.В., Игнатъев А.А. Динамическая модель процесса врезного шлифования с учетом износа шлифовального круга.....	71
Козлов Д.В., Игнатъев А.А. Экспериментальное исследование шлифованных валов вихретоковым методом.....	74
Королев А.В., Королев А.А., Носков А.С. Безабразивное суперфиниширование.....	77
Косырев С.П., Кудашева И.О. Неполная упругость металлов прецизионных деталей форсированных дизелей.....	80
Лазарев Д.Е., Насад Т.Г. Диаграмма контроля возникновения заусенцев при сверлении отверстий в деталях из нержавеющей стали.....	83
Лазарев Д.Е., Насад Т.Г. Повышение качества обработки поверхности и точности размеров при растачивании глубоких отверстий.....	87
Лазарев Д.Е., Насад Т.Г. Режущие инструменты для повышения качества и производительности механической обработки точных отверстий.....	90
Макеев Д.Н. Методика экспериментальных исследований получения и обработки покрытий с интерметаллидами.....	95

Маношин Д.В., Насад Т.Г. Экспериментальные исследования зависимости износа и шероховатости от режимов обработки для прецизионных сплавов.....	100
Маношин Д.В., Насад Т.Г. Метод повышения стойкости режущих твердосплавных пластин для обработки труднообрабатываемых сплавов.....	105
Маношин Д.В., Насад Т.Г. Влияние режима резания на окружную силу P_z при обработке прецизионного сплава 36НХТЮ.....	108
Мефедова Ю.А. Расчет рукавов высокого давления по распределению нагрузки между слоями оплетки.....	110
Митин С.Г., Бочкарёв П.Ю., Бокова Л.Г. Разработка технологических операций с учётом показателя технологичности в системе планирования многономенклатурных технологических процессов.....	116
Носков А.С., Королёв А.В. Исследование технологии нанесения на поверхность дорожки качения подшипников твердой графитовой смазки методом ультразвуковой поверхностной обработки.....	121
Носков А.С., Балтаев Т.А. Ультразвуковая финишная обработка с эффектом нанесения твердой графитной смазки.....	124
Павлюков А.О., Мелентьев В.А. Исследование взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого материала при обработке деталей в псевдооживленном слое абразива.....	129
Погораздов В.В., Горбачёв В.О. Моделирование в mathcad формообразования межзубцовой впадины рейкой с фланком и протуберанцем.....	131
Решетникова О.П., Королёв А.В. Математическая модель процесса формирования точностных параметров дорожек качения колец упорных подшипников.....	136
Решетникова О.П. Экспериментальные исследования способа торцового шлифования дорожек качения колец упорных подшипников.....	143
Салимов Б.Н., Балтаев Т.А. Моделирование процесса формообразования дорожки качения кольца шарикоподшипника на операции суперфиниширования развернутым бруском.....	148
Скоробогатова Т.Н. Моделирование концентрации напряжений на участке коленчатого вала маломощного дизеля методом систем с распределенными параметрами.....	152
Слитников К.Л., Попова И.М., Данилов И.К. Совершенствование планирования эксплуатационно-ремонтных циклов двигателей внутреннего сгорания (ДВС).....	157
Черкасова С.А., Боровских В.Е. Полимерные материалы в машиностроении и их опыт использования в корпусах автомобилей.....	161
Шалунов В.В., Комаревцев Д.В., Семенихин И.М. Автоматизированное проектирование технологических операций, выполняемых на токарно-фрезерных автоматах продольного течения с ЧПУ.....	165
Шпилев В.В., Решетников М.К., Давиденко О.Ю. Моделирование гетерогенной струи при гидроабразивной резке.....	170

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Виноградов М.В., Игнатьев А.А., Сигитов Е.А. Обеспечение точности исполнительных движений в прецизионных автоматизированных станках на основе привода подачи с многоступенчатой фрикционной передачей.....	175
Добряков В.А. Контроль динамического состояния станков в системе мониторинга технологического процесса.....	184

Ефремова Т.А. Расчет скорости течения жидкости при электрогидравлическом импульсном воздействии как системы с распределенными параметрами.....	190
Каракозова А.В., Игнатьев А.А. Предпосылки создания экспертной системы для контроля динамического состояния шлифовальных станков.....	194
Козлова Т.Д., Самойлова Е.М. Методика разработки экспертной системы для определения причин неисправностей автоматизированных станочных модулей.....	201
Козлова Т.Д., Игнатьев А.А. Экспертная система поддержки принятия решений при диагностировании автоматизированных станочных модулей.....	207
Комлева О.А., Игнатьев А.А. Система автоматического управления с применением электромагнитореологического управляющего элемента.....	213
Корнилова Н.В., Щербаков М.А. Статические и динамические характеристики электромагнитной управляющей оболочки аппарата «искусственное сердце».....	217
Курилова Е.В., Игнатьев С.А. Разработка алгоритма диагностирования подшипников качения по параметрам вибрации.....	223
Кравченко С.А., Набилкин А.Ю., Бирюков В.П. Многосвязная система управления силой резания и положением резца по поперечной оси.....	226
Кравченко С.А., Набилкин А.Ю., Бирюков В.П. Решение задачи повышения эффективности системы управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке.....	230
Мартынов В.В., Мартынов П.В. Основы синергетической концепции формирования данных о состоянии сложных технологических объектов.....	237
Набилкин А.Ю., Кравченко С.А., Бирюков В.П. Выбор структуры автоматизированной системы управления формой нежестких валов при токарной обработке.....	244
Набилкин А.Ю., Кравченко С.А., Бирюков В.П. Математическая модель объекта управления формой нежестких валов при токарной обработке.....	248
Набилкин А.Ю., Кравченко С.А., Бирюков В.П. Синтез и анализ эффективности многомерного стохастического лкг-регулятора формы нежестких валов при токарной обработке.....	254
Николаенко Ю.В., Власов А.В. Исследования магнитожидкостного волнового насоса....	262
Рожков И.А., Иващенко В.А., Игнатьев А.А. Методика распознавание дефектов в деталях подшипников.....	266
Самойлова Е.М., Игнатьев А.А. Интеллектуализация проектирования и мониторинга технологического процесса на основе применения SCADA-системы.....	272
Садчикова Г.М., Мамолина А.П. Результаты экспериментальных исследований и математическая модель гэшпр применяемого для измерения расхода жидкости в открытых каналах.....	277
Садчикова Г.М., Мамолина А.П. Теоретические основы разработки математической модели гидроэлектрического поляризационного преобразователя расхода в открытых каналах.....	282
Чернова Н.М., Кобзев Р.А. Выбор целевой функции оптимального проектирования металлических конструкций козловых кранов.....	286
Чернова Н.М., Кобзев Р.А. Использование вероятностного анализа безопасности при оптимальном проектировании металлоконструкций кранов высоких классов ответственности.....	2902

ФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Кожанова Е.Р., Захаров А.А. Возможность применения экспертной системы для отбраковки и настройки магнитной периодической фокусирующей системы.....	295
---	-----

Минаев Е.Н. Метод расчёта поля в электрохимической системе щель – плоская поверхность.....	299
Минаев Е.Н. Метод контроля концентрации кислорода, растворённого в водных средах.....	305

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Лясников В.Н., Протасова В.А., Пошивалова Е.Ю. Современные материалы и технологии в производстве внутрикостных имплантатов.....	312
Фомин А.А., Родионов И.В., Петрова Н.В., Захаревич А.М. Модификация металлооксидными соединениями поверхности медицинских изделий из стали 12х18н10т при воздействии токов высокой частоты.....	316

ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ

Чепеленко К.О. Топологическое пространство искусства.....	320
--	-----

ЭКОНОМИКА

Глушкова Ю.О., Пахомова А.В. Формирование и инновационные подходы к координации внешнеторговых потоков в рамках АТЭС.....	327
Томашевский Е.Ю., Митяшин Н.П. Использование нечеткого вывода в модели оценки эффективности регионального инвестиционного процесса.....	331

CONTENTS

ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

Belov A.P., Bochkaryov P.J. Choice of rational technological process in the conditions of multinomenclature manufacture on the basis of constructive communications.....	10
Bokova L.G., Bochkarev P.Y. Structure assessment production details processability in the diversified mechanical systems.....	13
Bochkarev A.P. Improvement of processing of hollow bodies of spherical shape.....	19
Brzhozovsky B.M., Martynov V.V., Zinina H.P., Starinnova V.O. Initial conditions for experimental study of the process of plasma update a working of cutting tool	22
Grebennikov S.A., Grebennikov A.S., Fedorov D.V. The irregularity of technical condition change of engine gas-distributing mechanism elements'.....	28
Ermolcheva N.V., Korolyov A.V., Orlov B.S., Rodionov I.V. Effect of the main factors discrete vibration cutting For volume data surface microrelief.....	35
Ermolcheva N.V., Korolyov A.V., Orlov B.S., Rodionov I.V. Effect of structural elements of discrete devices for vibration cutting shape and parameters of surface microrelief.....	38
Denisov A.S., Tugushev B.F., Gorshenina E.Y. Stress analysis of the second kind in the crankshft, the restoration of surfacing metal coating.....	43
Denisov A.S., Asoyan A.R., Yudin V.M. Increased durability rod bearing engine kamaz, by improving the technology of repair rod.....	50
Ignatyev A.A., Karakozova V.A. Definition of admissible giving of the grinding circle on the stock of stability of dynamic system for the choice of the mode of processing and the account in monitoring system.....	55
Ignatjev A.A., Konovalov V.V., Sokolova T. Experimental analytical determination of function of transmission of lathe machine tool dynamic system at cutting.....	61
Ivanov A.A., Bochkarev P.Yu. The review of application of simple priority rules when scheduling for small-scale production.....	66
Kozlov D.V., Ignatyev A.A. Dynamic model of plunge grinding adjusted for grinding wheel wear.....	71
Kozlov D.V., Ignatyev A.A. Experimental investigation of grinded shafts by eddy current method.....	74
Korolev A.V., Korolev A.A., Noskov A.S. Ultrasonic superfinish processing.....	77
Kosyrev S.P., Kudasheva I.O. Incompleteelasticityofthemetalsprecisionpartsboosteddiesels.....	80
Lazarev D.E., Nasad T.G. The control chart of drilling burr in stainless steel.....	83
Lazarev D.E., Nasad T.G. Improving of surface quality and dimensional accuracy during boring of deep holes	87
Lazarev D.E., Nasad T.G. Cutting tools for improving of quality and productivity of precise holes processing.....	90
Makeev D.N. Technique of pilot studies of receiving and processing of coverings with intermetallidami.....	95
Manoshin D.V., Nasad T.G. Experimental researches of dependence of deterioration and roughness from modes of processing for precision alloys	100
Manoshin D.V., Nasad T.G. Method for increasing the resistance of hard reschuschih plates for processing hard-alloys.....	105
Manoshin D.V., Nasad T.G. Influence of the mode of cutting on force Pz at processing of the precision alloy 36HXTIO.....	108
Mefedova J.A. Calculation of hoses of high pressure for load distribution between braiding layers.....	110

Mitin S.G., Bochkarev P.Yu., Bokova L.G. Design of technological operations considering of manufacturability in multinomenclature processes planning system.....	116
Noskov A.S., Korolev A.V. Texnology research applied to a surface raceway bearing solid graphite lubricant by ultrasonic surface treatment.....	121
Noskov A.S., Baltayev T.A. Ultrasonic finishing processing with effect of drawing of firm graphitic greasing.....	124
Pavlyukov A.O., Melentyev V.A. Research of interaction of abrasive grain and processed material when processing details in psevdoozhizhenn the abrasive layer.....	129
Pogorazdov V.V., Gorbachev V.O. Modeling in Mathcad shaping depression rake with the flanks and prominences.....	131
Reshetnikova O.P., Korolev A.V. Mathematical model of formation precision parameters of race of bearing rings.....	136
Reshetnikova O.P. Experimental research a frontal method of Grinding of bearing rings.....	143
Salimov B.N., Baltayev T.A. Simulation of forming raceways of ball bearings for operations superfinishing expand abrasive bar.....	148
Skorobogatova T.N. Modelling of concentration of pressure on site of the cranked shaft of the low-power diesel engine the method of systems with the distributed parameters.....	152
Slitnikov K.L., Popova I.M., Danilov I.K. Improving the planning of the operation and maintenance cycles of internal combustion engines (ice).....	157
Cherkasova S.A., Borovskih V.E. Polymeric materials in mechanical engineering and their experience of use in cases of cars.....	161
Shalunov V.V., Komarevtsev D.V., Semenikhin I.M. Automated design of production operations at cnc-milling machines cnc longitudinal turning.....	165
Shpilev V.V., Reshetnikov M.K., Davidenko O.Y. Modeling of heterogeneous jets during waterjet cutting.....	170

AUTOMATION AND MANAGEMENT

Vinogradov M.V., Ignatyev A.A., Sigitov E.A. Maintenance of accuracy of executive movements in the precision automated machine tools on the basis of a drive of giving.....	175
Dobryakov V.A. Control of the dynamic condition of machines in system of monitoring of technological process.....	184
Efremova T.A. Calculation of the rate of flow of liquid electrohydraulic pulses as a systems with distributed parameters.....	190
Karakozova A.V., Ignatyev A.A., Use of expert systems for dynamic control of grinding machines.....	194
Kozlova T.D. Method development expert system to determine the cause automated machine module.....	201
Kozlova T.D., Ignatiev A.A. Expert decision support system for automated diagnosing machine tool modules.....	207
Komleva O.A., Ignatyev A.A. System of automatic control with elektromagnitoreologicheskyy's application of the managing director of the element.....	213
Kornilova N.V., Shcherbakov M.A. Static and dynamic characteristics of the electromagnetic operating cover of the device «artificial heart».....	217
Kurilova E.V., Ignatyev S.A. Development of diagnostic algorithm rolling bearings for vibration parameters.....	223
Kravchenko S.A., Nabilkin A.Y., Biryukov V.P. Multicoupling control system of cutting force and cutting tool transverse position.....	226
Kravchenko S.A., Nabilkin A.Y., Biryukov V.P. Solving of the problem of increasing the efficiency of control system of longitudinal profile of nonrigid shafts in lathing.....	230

Martynov V.V., Martynov P.V. The foundations of the synergetic concept of the formation of data on the state of complex technological objects.....	237
Nabilkin A.Y., Kravchenko S.A., Biryukov V.P. Selection of structure of the automated control system of nonrigid shaft form during the lathing.....	244
Nabilkin A.Y., Kravchenko S.A., Biryukov V.P. Mathematical model of controlled object of nonrigid shafts form with lathing.....	248
Nabilkin A.Y., Kravchenko S.A., Biryukov V.P. Synthesis and efficiency analysis of multi-variable stochastic lqg-regulator of non-rigid shafts form in lathing.....	254
Nikolaenko Y.V., Vlasov A.V. Research magnitizhivkostnogo wave pump.....	
Rozhkov I.A., Ivaschenko V.A., Ignatiev A.A. Technique recognition of defects in bearings details.....	259
Samoylova E.M., Ignatiev A.A. Intellectualization design and monitoring process based on the use of scada-system.....	264
Sadchikova G.M., Manolina A.P. Mathematical model hpcc of the charge of the liquid applied to measurement in the open channels.....	269
Sadchikova G.M., Manolina A.P. Theoretical bases of development mathematical models hydroelectric поляризованного converter of consumption in an open channels.....	274
Chernova N.M., Kobzev R.A. Choice of criterion function in terms of gantry crane metalworks optimum design.....	283
Chernova N.M., Kobzev R.A. Use of the probstylistic safety analysis in terms of optimum projection of high class responsibility cranes metalworks.....	286

ФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Minaev E.N. Metod for calculation of electrical field in the electrochemical system chink - plane surface.....	292
Minaev E.N. Method for control of oxygen, dissolved in the aqueous solutions.....	298

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Lyasnikov V.N., Protasova V.A., Poshivalova E.Y. Modern materials and technology in the manufacture of endosseous implants.....	305
Fomin A.A., Rodionov I.V., Petrova N.V., Zakharevich A.M. Surface modification with metal oxide compositions on 12x18H10T steel medical items using high frequency current.....	308

PHILOSOPHY, SOCIOLOGY AND CULTUROLOGY

Kozhanova E.R., Zakharov A.A. Possibility of application of expert system of rejection and control magnetic periodic focusing system.....	313
Tshepelenko K.O. The topological structured space of art.....	317

ECONOMICS

Glushkov YU.O., Pakhomova A.V. Formation and innovative approaches to coordination of the foreign trade streams within APEC.....	325
Tomashevskiy E.Y., Mityashin N.P. Fuzzy model for evaluating the effectiveness of regional investment process.....	330

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.791.03-52

А.П. Белов, П.Ю. Бочкарёв

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В УСЛОВИЯХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ КОНСТРУКТИВНЫХ СВЯЗЕЙ

Показан метод выбора перспективного технологического процесса.

Размерные связи, размерный анализ, теория графов, конструктивные элементы

A.P. Belov, P.J. Bochkaryov

CHOICE OF RATIONAL TECHNOLOGICAL PROCESS IN THE CONDITIONS OF MULTINOMENCLATURE MANUFACTURE ON THE BASIS OF CONSTRUCTIVE COMMUNICATIONS

The method of a choice of perspective technological process is shown.

Dimensional communications, the dimensional analysis, the theory of counts, constructive elements

В настоящее время основную часть машиностроительных предприятий составляют организации с серийным и мелкосерийным производством. Быстрый рост развития технического оснащения (продукции) способствует быстрому налаживанию и освоению выпуска нового вида продукции. В результате происходит увеличение временных и материальных затрат на технологическую подготовку производства (ТПП). В связи с этим снижается качество принятых проектных решений при разработке ТП. Поэтому при разработке ТП должно учитываться многовариантность принятого оптимального и правильного технологического решения. Именно при механической обработки деталей и задаётся качество всего изделия целиком.

Одним из методов обеспечения заданных конструктором параметров качества деталей является применение размерного анализа спроектированного ТП, на основе результатов которого даётся заключение о качестве разработанного ТП. Применение данного метода выполняется на заключительной стадии разработки, когда ТП полностью спроектирован. Это во многом сужает потенциальные возможности использования размерного анализа в технологической подготовке ограничивая только контрольными задачами выполнения заданных требований при реализации ТП, и не позволяет вести анализ на отдельных проектных

процедурах и разработке ТП. Особое значение это имеет при многовариантном подходе к составлению технологии с учётом реальной сложившейся производственной ситуацией.

Другим направлением развития использования размерного анализа является возможность полного использования информации по конструктивным характеристикам детали и эксплуатационным условиям её работы заложенных конструктором в процессе проектирования (наряду с чертежом детали) на этапе технологической подготовки производства (ТПП). В этом случае появляется возможность принимать отдельные технологические решения на основе более достоверных и полных данных о возможности метода обработки отдельных поверхностей детали.

Рассмотрим деталь «Вал», участвующая в работе сборочного узла редуктора. В сборочном узле «Вал» ориентируется с помощью торцов и цилиндрических поверхностей.

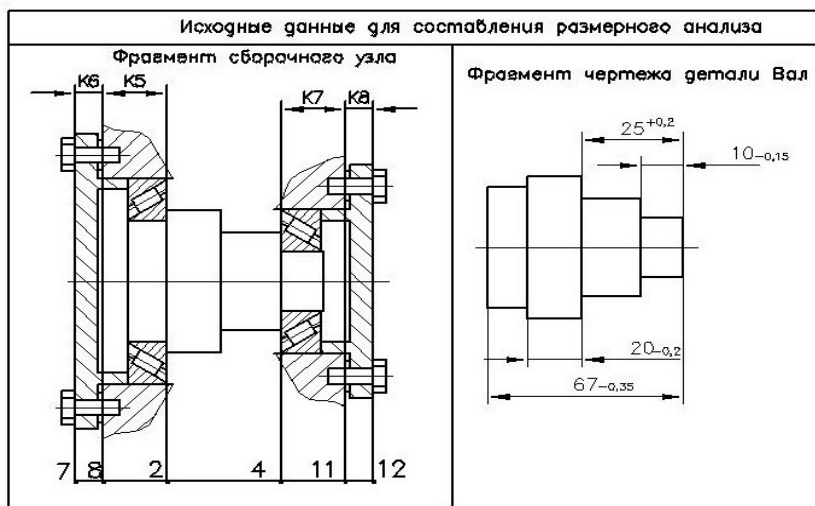


Рис. 1. Исходные данные

Используя конструкторские размеры, припуски и поверхности формируется конструкторский граф.

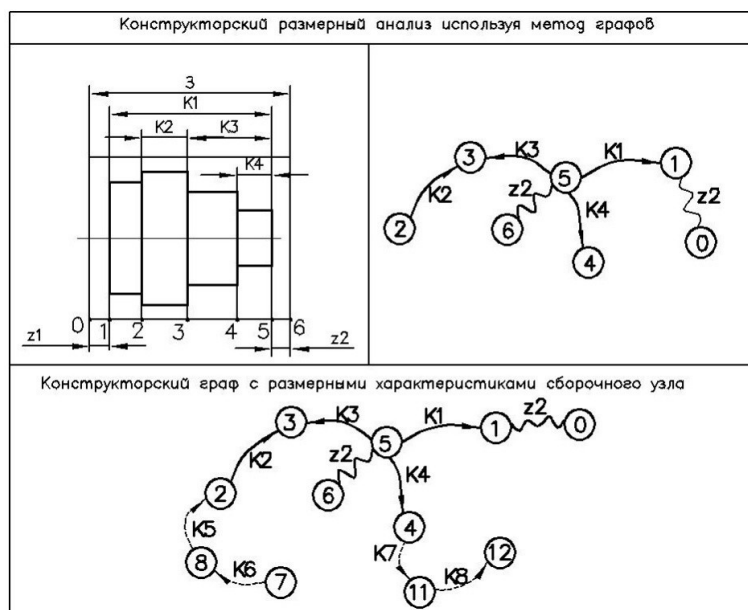


Рис. 2. Размерный анализ

Дополняя конструкторский граф размерными характеристиками сборочного узла (пунктирная линия) можно увидеть, что именно 2 и 4 поверхность являются основными в ра-

боте детали. Выполнение именно этих поверхностей большей частью влияет на работоспособность и качество изделия.

Технология изготовления вала состоит из множества операций, но рассмотрим получение 2 и 4 поверхностей. Эти поверхности формируются за две операции на токарно-винторезном станке. Рассмотрим 2-ва варианта получения этих поверхностей.

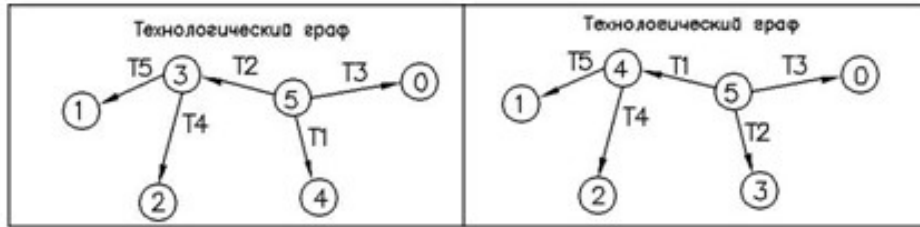


Рис. 3. Технологический анализ

Основываясь на ТП, строится технологическая размерная схема для каждого из вариантов. На ней представлены припуски (z), конструкторские (K) и технологические (T) размеры. Каждая получаемая поверхность представлена в виде пронумерованных точек.

Используя технологические размеры и точки (поверхности) строится технологический граф. Проанализировав граф можно сделать выводы о том, что 5 поверхность является базой для образования 0, 4 и 3 поверхности, а 3-я поверхность базой для 1 и 2 поверхностей. Тем самым соблюдается принцип постоянства баз. Объединяя конструкторский и технологический граф образуются совмещённые графы. Анализируя 1-ый вариант выявляется то, что при получении 4, 3 и 2 поверхностей конструкторские размеры соответствуют технологическим размерам. Во 2-ом варианте только при получении 4 и 3 поверхностей. Это говорит о том что выполняется принцип единства баз. При совмещении графов образуются циклы, из которых состояются математические уравнения.

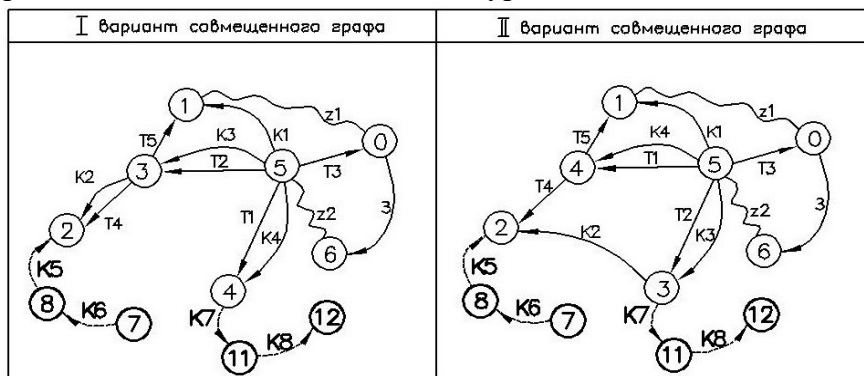


Рис. 4. Совмещённые графы

Используя математический образ (модель) деталь представляется графически в виде некоторой геометрической фигуры. Для технологических размерных расчетов используется так называемый граф-дерево [1]. Так как рёбра образуют замкнутые цепи, что позволяет расписать ТП математическим уравнением.

I вариант системы уравнений математической модели	II вариант системы уравнений математической модели
<p style="text-align: center;">Принцип постоянства баз</p> $T1 = K4$ $T2 = K3$ $T4 = K2$ $z1 + K1 - T3 = 0$ $K1 - K3 - T5 = 0$ $T2 - T5 - K1 = 0$ $z2 + T3 - 3 = 0$	<p style="text-align: center;">Принцип постоянства баз</p> $T1 = K4$ $T2 = K3$ $T4 - K4 + K3 - K2 = 0$ $z1 + K1 - T3 = 0$ $K1 - K3 - T5 = 0$ $z2 + T3 - 3 = 0$ $T4 - T1 + T2 + K2 = 0$

Рис. 5. Математические модели

Математическая модель состоит из 5-ти линейных уравнений. Количество уравнений соответствует количеству неизвестных (операционных размеров). Чем меньше количество составляющих в уравнении, тем точнее выполняемый размер. Идеальный случай, когда конструкторский размер совпадает с технологическим размером. В 1-ом варианте операционный размер $T_4=K_2$, а во 2-ом варианте на этот размер влияет точность ещё 3-х составляющих. Происходит отсев вариантов ТП по критерию лишних уравнений в системе. На основе решения формируется система конструкторско-технологических графов. Выбор оптимального технологического процесса основывается на критериях точности и эффективности.

Задача системы заключается в нахождении для данных производственных условий оптимального варианта перехода от заготовки, поставляемой на машиностроительный завод, к готовой детали. Технологические операции можно выполнять различными способами, отличающимися вариантами базирования заготовки в приспособлении.

По результатам использования разработанной системы можно сделать вывод: повышается качество изготавливаемых изделий, увеличивается функционирование САПР, исключаются ошибки при проектировании, появляется возможность многократной проверки ТП и корректировка на этапе технологической подготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колёсов И.М. основы технологии машиностроения: учеб. для машиностроит. Спец. Вузов / И.М. Колёсов. 3-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2001. 591 с.

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

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

Бочкарёв Пётр Юрьевич -
Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Проектирование
технических и технологических комплексов»
Саратовского государственного
технического университета

Botchkarev Peter Jurevich -
Dr.Sci.Tech., the professor managing
chair «Designing of technical
and technological complexes»
of Saratovvsky state technical university

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.791.03-52

Л.Г. Бокова, П.Ю. Бочкарёв **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ** **ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ УСЛОВИЙ** **МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

В статье предлагается метод оценки производственной технологичности деталей применительно к условиям многономенклатурных механообработывающих систем.

Оценка технологичности деталей, производственная технологичность многономенклатурные производственные системы, механообрабатывающее производство

L.G. Bokova, P.Y.Bochkarev

**STRUCTURE ASSESSMENT
PRODUCTION DETAILS PROCESSABILITY
IN THE DIVERSIFIED MECHANICAL SYSTEMS**

In article the method of an assessment of production adaptability to manufacture of details with reference to conditions of multinomenclature mekhanooobratyvayushchy systems .

Diversified production systems, production manufacturability evaluation technological details, production machining

Определяющим понятием технологичности конструкции является обеспечение возможности наиболее экономичного изготовления деталей при требуемом качестве. Особую значимость это приобретает в условиях многономенклатурного характера механообрабатывающих производств, когда необходимо дать оценку технологичности широкой номенклатуре деталей, а эффективность изготовления во многом зависит от реально складывающейся производственной ситуации, и оценка технологичности должна учитывать данный фактор. Поэтому с одной стороны требования производства должны учитываться при конструкторском проектировании, а с другой стороны – технологическая подготовка производства должна быть способной на основе оценки технологичности деталей спрогнозировать эффективность выполнения требуемых работ в условиях реальной производственной системы.

В течение длительного времени и в настоящее время в практике отработки деталей на технологичность основное место занимает качественная оценка принимаемых конструкторских решений. Это подтверждается представленными на рис. 1 и 2 сформированными на основе нормативно-технической документации и результатов анализа научно-технической литературы связями между стадиями разработки конструкции изделий и функциями, задачами работ по оценке их технологичности. Такая оценка часто бывает субъективной и без учета изменения технологии в связи с разными серийностью выпуска и производственными условиями.

Отсутствие подходов к автоматизации качественной оценки деталей на технологичность конструкции связано с трудностью формализации этого этапа конструкторско-технологической подготовки производства. Кроме этого отсутствие информационных моделей технологического оборудования добавляет дополнительные трудности в создании автоматизированной подсистемы оценки технологичности конструкции.

Решение задачи создания автоматизированной подсистемы оценки производственной технологичности деталей возможно в условиях создаваемой системы планирования многономенклатурных технологических процессов [1]. В рамках ее разработки сформированы базы данных по технологическим возможностям технологического оборудования и формализованы проектные процедуры разработки маршрутной, операционной технологии и реализации технологических процессов с учетом реально складывающейся ситуации в условиях многономенклатурных механообрабатывающих производственных систем. В работе [2] представлена структура оценки производственной технологичности деталей, последовательность вычислительных процедур и решаемые в рамках их задачи. Принципиальным отличием предлагаемого подхода является проведение оценки технологичности для всех деталей, изготовление которых заплани-

ровано одновременно. 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.

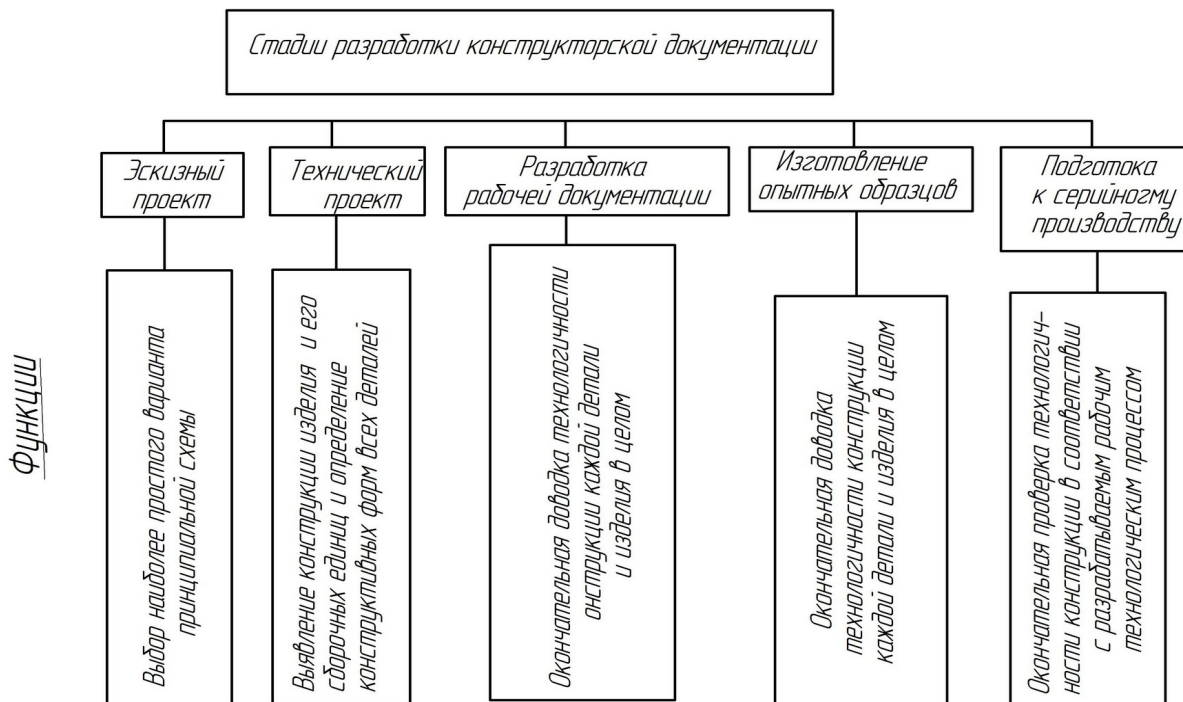


Рис. 1. Связь между стадиями разработки конструкторской документации и функциями оценки технологичности

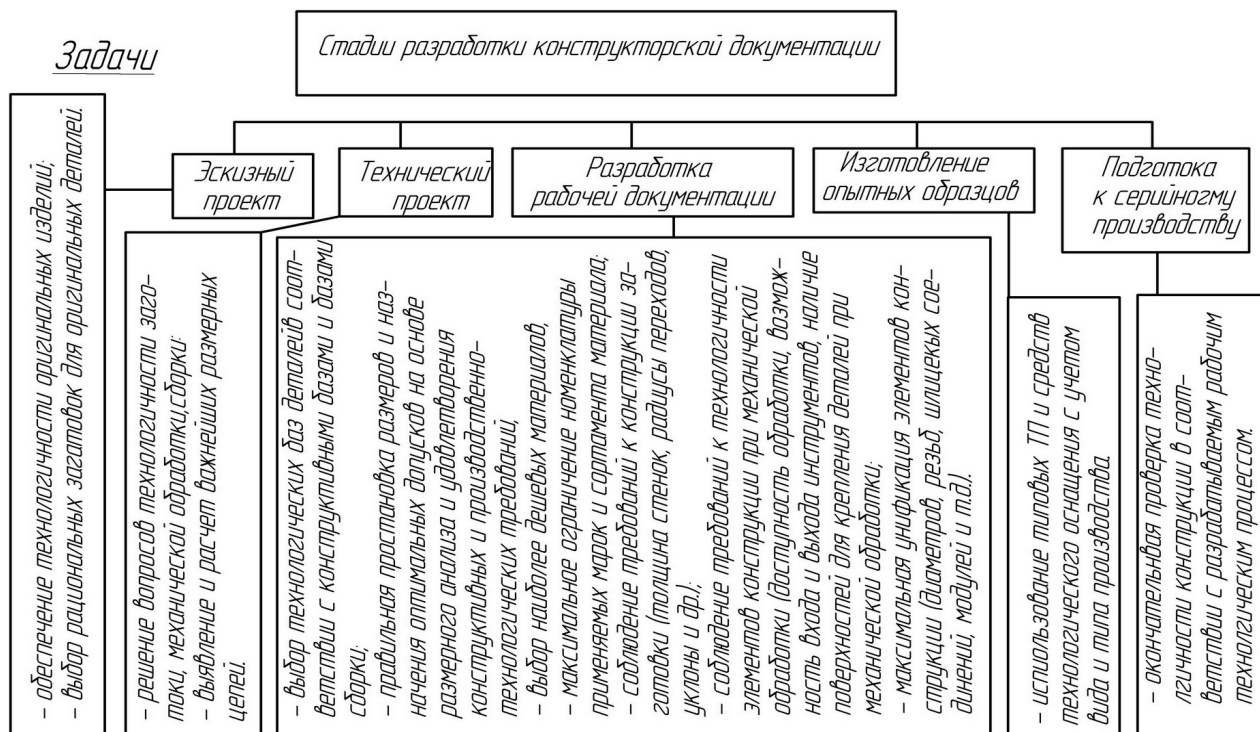


Рис. 2. Связь между стадиями разработки конструкторской документации и задачами оценки технологичности

Следующим этапом исследований стали работы по определению влияния критериев на эффективность функционирования механообрабатывающих систем применительно к конкретным производственным системам.

Рассматривая группу критериев, в задачу которых входит оценка возможности изготовления конструктивных элементов деталей в рамках рассматриваемой производственной системы рис.3,4 (геометрические параметры конструктивных элементов, пространственные связи с другими конструктивными элементами детали, точностные характеристики, характеристики поверхностного слоя), можно сделать заключение, что целью их применения является получение заключения о функциональной возможности производственной системы провести обработку детали с заданными требованиями и качеством. Данная проектная процедура предполагает сравнение характеристик отдельных элементов и всей детали в целом, заданных конструктором, с однородными характеристиками, отражающими технологические возможности оборудования в рамках производственной системы. Невыполнение любого требования по обеспечению технологическими возможностями заданных характеристик детали приводит к отсеву детали из номенклатуры, закрепленной за рассматриваемой производственной системой.

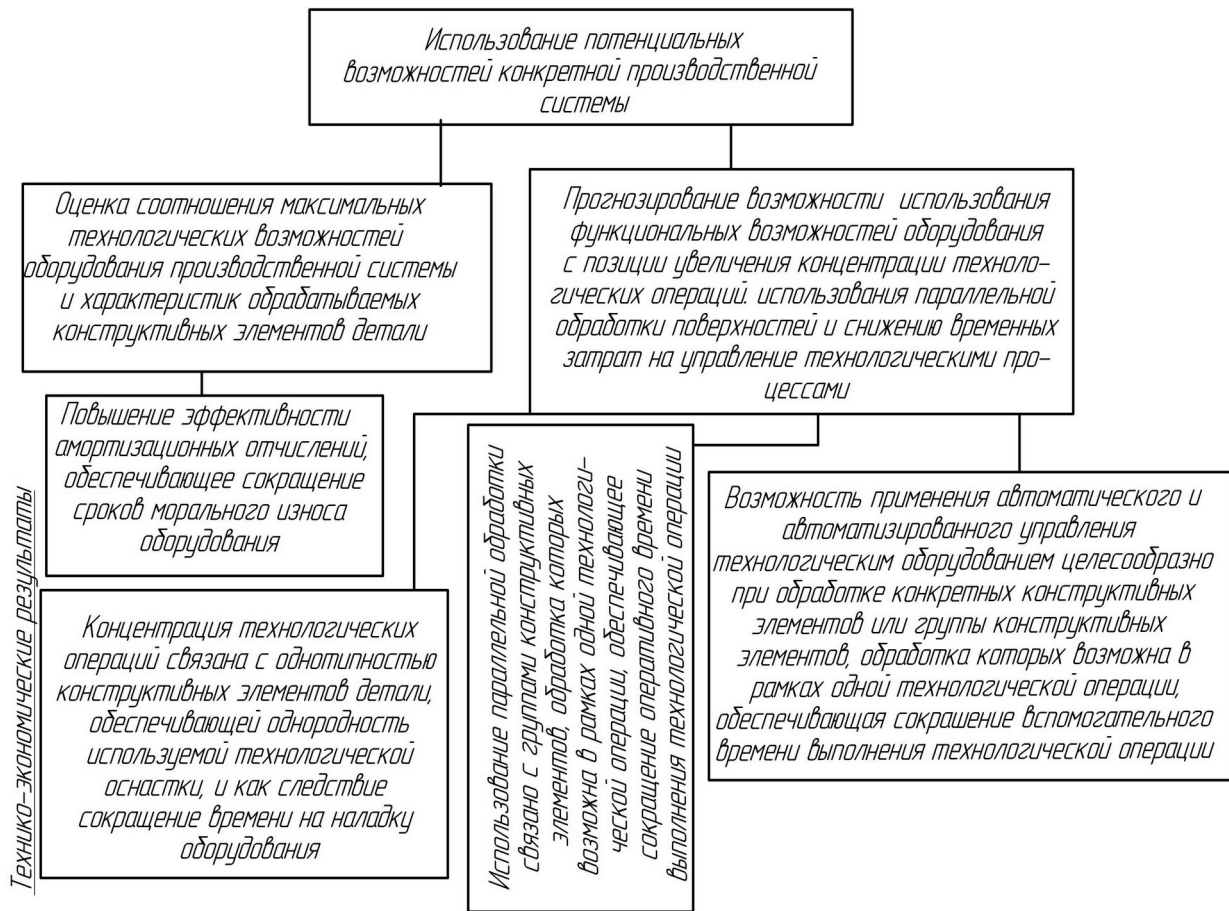


Рис.3. Использование критериев для оценки технологичности при анализе потенциальных возможностей производственной системы

Другая группа критериев связана с прогнозированием эффективности работы производственной системы при обработке заданной номенклатуры деталей рис.4. Каждый из этих критериев связан с потенциальной возможностью повысить эффективность выполнения технологических процессов, но степень их влияния различна и требует оценки для каждой складывающейся производственной ситуации. Построение методики определения влияния критериев предлагается вести с позиции принятой в системе планирования многономенклатурных технологических процессов, когда в качестве критерия эффективности работы производственной системы является время изготовления заданной номенклатуры деталей (выполнения производственного задания) и затраты на работу системы за этот период. Таким образом, влияние каж-

дого из критериев будет определяться возможным сокращением удельного по отношению к общему времени обработки комплекта деталей, и задачей настоящих исследований является установление связей между соответствующим критерием и составляющей в структуре затрат времени на обработку деталей.

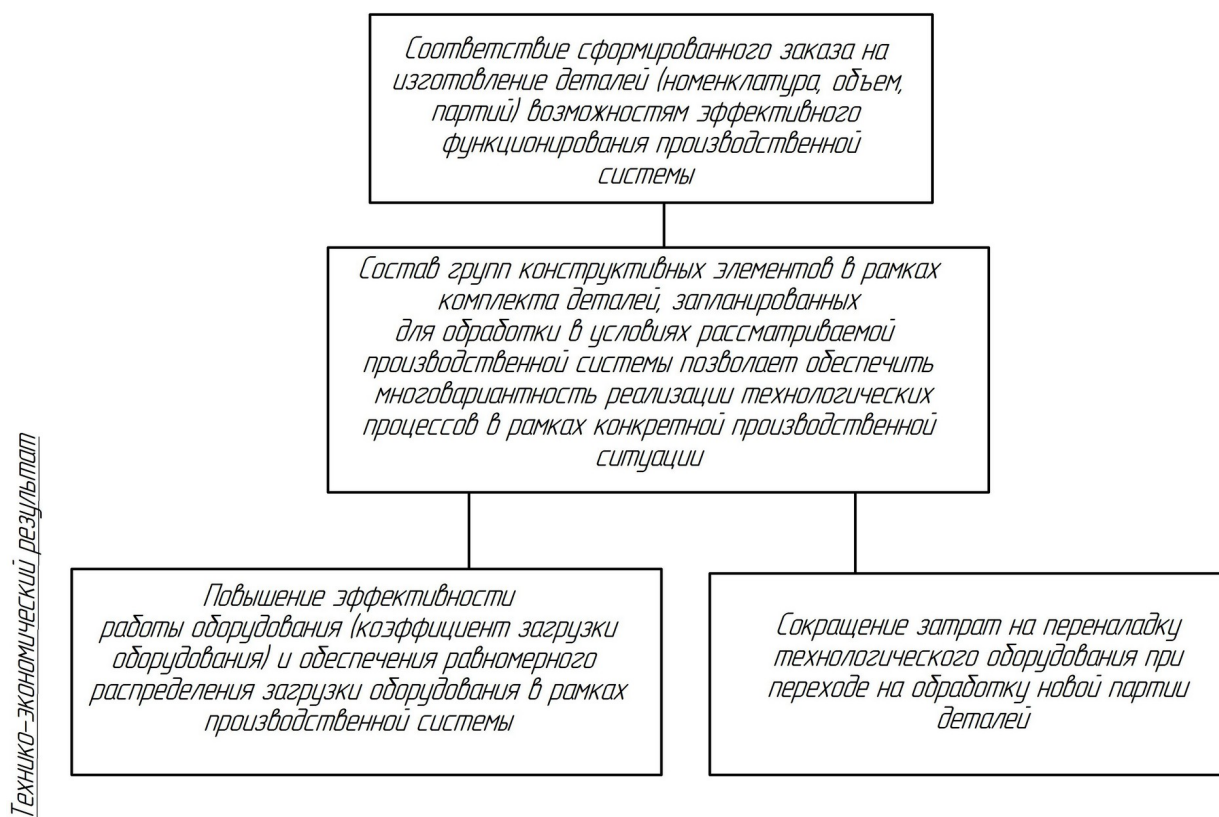


Рис.3. Использование критериев для оценки технологичности при анализе эффективности функционирования производственной системы

Прогнозирование использования функциональных возможностей оборудования с позиции увеличения концентрации технологических операций, использования параллельной обработки поверхностей и снижение затрат на управление технологическими процессами ведется на основе критериев, оценивающих однотипность конструктивных элементов детали, их точностные характеристики. На основе имеющейся базы данных по технологическим возможностям оборудования устанавливается связь между показателями однотипности (характеристики детали) и множеством средств технологического оснащения, которые могут применяться при обработке. Используя аппарат кластерного анализа, устанавливается количественная характеристика, отражающая унификацию применения технологической оснастки при изготовлении запланированной номенклатуры деталей. Увеличение однотипности конструктивных элементов деталей и соответственно уменьшение однородности технологической оснастки позволяет:

- Учесть изменение концентрации технологических операций при обработке однотипных конструктивных элементов детали, обеспечивающую однородность используемой технологической оснастки и как следствие сокращение времени на наладку оборудования. Таким образом, появляется возможность установить связь между критерием технологичности и сокращением подготовительно-заключительного времени и соответствующую долю к общим временным затратам при изготовлении заданной номенклатуры деталей.
- Проанализировать уровень использования параллельной обработки в рамках одной технологической операции, приводящее к сокращению оперативного времени.

- Определить возможность применения автоматического и автоматизированного управления оборудованием в многономенклатурном производстве при обработке конкретных конструктивных элементов или групп элементов детали, что обеспечивает сокращение вспомогательного времени.

Одним из наиболее значимых критериев при оценке технологичности, по нашему мнению, является оценка соответствия максимальных технологических возможностей оборудования производственной системы и характеристик обрабатываемых конструктивных элементов деталей. Наиболее полное использование потенциала механообрабатывающего оборудования позволяет производить продукцию более высокого потребительского свойства, однако существующие экономические методики по определению затрат на амортизацию оборудования не стимулируют движения в этом направлении. Поэтому для установления взаимосвязи между критерием технологичности и эффективностью функционирования производственной системы было выбрано сокращение сроков морального износа оборудования.

Предлагаемые критерии технологичности, которые в наибольшей степени обеспечивают прогноз эффективности изготовления деталей, в зависимости от реального состояния производственной системы построены на оценке состава групп конструктивных элементов в рамках комплекта деталей, запланированных для обработки в условиях рассматриваемой производственной системы. Установление связей между видом и характеристиками элементарных поверхностей и возможностями ее обработки на различном оборудовании в рамках системы позволяет выйти на количественную оценку критерия технологичности, по которому можно судить о возможности многовариантной реализации технологических процессов в условиях конкретной производственной ситуации. Применение критериев, отражающих многовариантность технологических процессов, позволит иметь информацию:

- Прогнозирующий коэффициент загрузки технологического оборудования и обеспечение равномерного распределения загрузки оборудования в рамках производственной системы.
- Сравнить временные затраты на переналадку технологического оборудования и глубину переналадок при переходе на обработку новых партий деталей.

С целью количественной оценки критериев предлагается метод, включающий на первом этапе оценку уровня технологичности элементарных поверхностей с оценкой вариантов их многовариантной реализации, последующем объединении поверхностей каждой детали в группы поверхностей, реализация которых возможна в рамках одной операции. Связь между критериями и характеристиками функционирования производственной системы предлагается устанавливать с применением теории массового обслуживания, моделируя обработку сформированных групп поверхностей в производственной системе.

Предлагаемый метод оценки производственной технологичности позволяет обеспечить ее качественную оценку, направленную на совершенствование как конструкторской, так и технологической подготовки производства. Разрабатываемые полностью формализованные модели обеспечат на этапах предшествующих разработки технологии в системе планирования многономенклатурных технологических сделать заключение с количественной оценкой о возможности и экономической целесообразности изготовления деталей в рамках конкретной производственной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарев П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарев // Технология машиностроения, № 1, 2002. С. 10-14.
2. Бокова Л.Г. Структура оценки производственной технологичности деталей в многономенклатурных механообрабатывающих системах / Л.Г. Бокова // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. №56. С. 27-31.

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

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

Бочкарев Петр Юрьевич –
доктор технических наук, профессор
заведующий кафедры «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 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.775. 2

А.П. Бочкарев
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОБРАБОТКИ
ПОЛЫХ ТЕЛ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

В статье рассматриваются способы абразивной обработки нежестких тел сферической формы, имеющих применение в авиации. Эти способы были апробированы на практике и показали свою эффективность в условиях единичного, мелко- и среднесерийного производства.

Полая сфера, толщина стенки, заготовка, метод обработки

A.P. Bochkarev

IMPROVEMENT OF PROCESSING OF HOLLOW BODIES
OF SPHERICAL SHAPE

The paper discusses how non-rigid-body abrasion spherical shape that has applications in aviation. These methods have been tested in practice and proved to be effective in a single, small and medium sized production.

Flight sphere, thickness of the wall, stocking up, method of the processing

При эксплуатации высокоскоростных подшипниковых узлов, используемых в современной авиационной и космической технике, все острее проявляется проблема создания новых конструкций подшипников, обладающих высокой долговечностью и безотказностью. В последние 20–30 лет в подшипниковой промышленности ведутся исследования с целью разработки подшипниковых узлов, работающих при больших нагрузках, высоких скоростях вращения, повышенных температурах. Методы расчета подшипников качения общего применения на протяжении длительного времени не претерпевали значительных изменений. Объясняется это тем, что заложенный в них 90 % уровень надежности на определенном этапе удовлетворял требованиям всех отраслей техники. Существующие методы позволяют с помощью полуэмпирических зависимостей определять расчетную долговечность подшипников и с помощью формул, основанных на теории Герца, проверять контактные напряже-

ния, которые для каждой конструктивной разновидности не должны превышать некоторых заданных значений.

Появление новых отраслей техники, нуждающиеся в высокоточных подшипниках с большим сроком службы (10000 ч. и более) и высоким уровнем надежности (99,9 % и выше), поставило перед подшипниковой промышленностью задачу создания новых конструктивных разновидностей узлов качения, отвечающим этим требованиям. Примером могут служить подшипники с полыми телами качения – полыми шариками. Эти подшипники, по сравнению с аналогичными традиционными подшипниками со сплошными шариками, имеют ряд преимуществ: обладают меньшей массой (что обуславливает их применение в авиастроении и космической технике), более быстроходны, малошумны, имеют меньший момент срабатывания и пр. Но широкому использованию полых тел качения в подшипниковых узлах препятствует отсутствие рациональных технологий, как получения заготовок полых шариков, так и их механообработки.

Десятки лет отечественные и зарубежные специалисты работают над созданием способа, позволяющего получить заданное многоосное вращение шара в зоне обработки. Разработаны десятки способов и устройств, которые можно условно разделить на две крупные группы, принципиально отличающиеся по схемам обработки. К одной группе можно отнести способы и устройства, основанные на дисковой схеме обработки, ко второй – способы и устройства, использующие бесцентровую схему обработки сферических тел. Лидирующее место по использованию в промышленности заняли способы и устройства, в основе которых лежит дисковая схема обработки. Основная часть предприятий с массовым и крупносерийным типом производства использует именно такую схему. Это, в подавляющем большинстве, предприятия подшипниковой промышленности, выпускающие подшипники качения с традиционными сплошными телами качения. Оборудование, использующее дисковую схему, имеет простую кинематику, несложно в обслуживании и достаточно производительное. К слабым местам дисковой обработки можно отнести высокое давление в зоне резания, необходимое для интенсификации снятия припуска и невозможность управлять величиной и расположением получаемой развертки сферы. Это особенно важно для тел, геометрически представляющих собой сферический фрагмент, а также полых шаров, имеющих пониженную конструктивную жесткость. Поэтому, использование оборудования, применяемого для шлифования полых шариков на предприятиях подшипниковой отрасли нерационально по двум основным причинам:

1) высокое технологическое давление, необходимое для активизации процесса удаления припуска, может привести к деформации полых шариков и даже их повреждению;

2) так как полые шарiki пока еще выпускаются ограниченными партиями на предприятиях не подшипникового профиля, то специальное оборудование будет по большей части простаивать, а значит, закупать его экономически не целесообразно.

В связи с этим, для обработки небольших партий полых шариков гораздо выгоднее использовать универсальное оборудование.

В связи с этим, нами предложен новый способ [3] бесцентрового шлифования шариков, в том числе, полых.

Устройство для реализации способа содержит шлифовальный круг 1, с выполненными на его рабочей поверхности винтовыми канавками 2, абразивный ведущий круг 3, с выполненной на его рабочей поверхности винтовой канавкой 4 и скошенный опорный нож 5, на котором размещают обрабатываемые шарiki 6 (рисунок).

Способ осуществляют следующим образом: шарик 6 получает вращение от ведущего круга 3 в сторону противоположную вращению шлифовального круга 1. Винтовые V-образные канавки 4 ведущего круга 3 перемещают вращающиеся шарiki 6 по поверхности шлифующих участков 7 шлифовального круга 1 вдоль оси его вращения. При прохождении обрабатываемым шариком 6 зоны винтовой канавки 2, выполненной на рабочей поверхности шлифовального круга 1, происходит прерывание контакта шарика 6 со шлифующими участ-

ками 7. Шарик 6 освобождается от действия на него сил резания и, в этот момент, происходит изменение динамического состояния технологической системы: шарик – ведущий круг – шлифовальный круг – опорный нож и шарик меняет свою ориентацию в пространстве. В результате этого происходит мгновенный разворот шарика на некоторый угол, величина которого зависит от многих как систематических, так и случайных факторов – времени прерывания контакта, шероховатости поверхностей обрабатываемой заготовки и опорного ножа, частоты вращения ведущего и шлифовального кругов, обрабатываемой заготовки, неравномерности распределения припуска по поверхности сферы, твердости материала шарика, коэффициентов трения контактных поверхностей и др. После прохождения шариком зоны винтовой канавки на шлифовальном круге он снова вступает в контакт со следующим шлифующим участком 7, что опять приводит к появлению натяга в технологической системе, изменению ее динамического состояния и развороту шарика, но уже под действием сил резания.

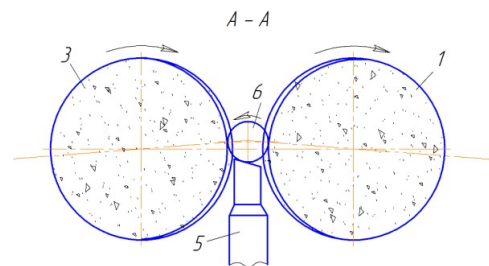


Схема способа обработки шарика:

1 – шлифовальный круг; 2 – винтовая канавка; 3 – ведущий круг;
4 – винтовая V-образная канавка; 5 – опорный нож; 6 – обрабатываемый шарик

Выполнение на шлифовальном круге канавки и, следовательно, шлифующих участков по винтовой линии позволяет многократно прерывать контакт шарика со шлифовальным кругом, что позволяет вести обработку дискретно, сферическими сегментами и осуществлять многократный разворот шарика вокруг своей оси и, в результате, вести обработку по всей обрабатываемой сферической поверхности. Так как шлифовальный круг имеет частоту вращения на порядок выше частоты вращения ведущего круга, то только за один оборот шарика вокруг своей оси он несколько десятков раз теряет ориентацию в пространстве и меняет свое угловое положение. Поэтому, за один проход вдоль периферии шлифовального круга шарик совершает несколько тысяч разворотов в зоне резания, что позволяет обработать поверхность шарика полностью. Мгновенные развороты шарика по величине очень незначительны – разворот происходит на малый телесный угол, за счет чего дискретность обработки не велика, а это способствует повышению качества обрабатываемой поверхности.

Предлагаемый способ может найти широкое применение для обработки деталей сферической формы в серийном производстве. Для этих целей можно использовать серийно выпускаемое бесцентрово-шлифовальное оборудование после его незначительной модернизации. В условиях изготовления небольших или одноразовых партий шариков применять специальное оборудование, используемое в массовом производстве для шлифования шариков, нецелесообразно, так как оно будет большей частью простаивать. Серийные же, бесцентрово-шлифовальные станки, после обработки партии шариков можно переналаживать на изготовление другой продукции, выпускаемой по номенклатуре производства. Кроме того, предлагаемый способ, как показали экспериментальные исследования, позволяет произ-

водить обработку шариков со значительной величиной припуска в несколько десятых долей мм, с высокой точностью и хорошим качеством поверхности. Это позволяет использовать такой метод на этапе как черновой, так и чистовой обработки. Еще одним достоинством этого метода является возможность обрабатывать сферические тела с пониженной жесткостью – полые тонкостенные шарики. Как показали экспериментальные исследования, при обработке полых шариков размером 1 дюйм, можно получать толщину стенок до 1 мм без пластического деформирования сферы, т.е. потери ее формы. Это достигается за счет малых величин сдавливающих сил при обработке, в отличие от дисковой обработки, использующей многотонное давление при изготовлении сплошных монолитных шариков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васин А.Н. Получение заготовок полых тел качения / А.Н. Васин, П.Ю. Бочкарев // Технология машиностроения. 2004. № 4 (28). С. 3-6.
2. Васин А.Н. Влияние величины и расположения припуска по сферической поверхности заготовки при изготовлении тел качения / А.Н. Васин, П.Ю. Бочкарев // Технология машиностроения. 2005. № 9 (39). С. 18-22.
3. Патент РФ № 2212979. Способ изготовления полых монолитных деталей. П.Ю. Бочкарев // БИ. 2003. № 27.

Бочкарёв Антон Петрович -
аспирант кафедры «Проектирование
технических и технологических комплексов»
Саратовского государственного
технического университета

Botchkarev Anton Petrovich –
The post-graduate student
of chair «Designing of technical
and technological complexes»
of the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.9.048.7:621.9.025

Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина, В.О. Стариннова

ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Сформулированы предпосылки для проведения экспериментального исследования влияния параметров процесса плазменной модификации на микротвердость рабочей части режущего инструмента.

Процесс плазменной модификации, режущий инструмент, планирование эксперимента, микротвердость

B.M. Brzhozovsky, V.V. Martynov, H.P. Zinina, V.O. Starinnova

INITIAL CONDITIONS FOR EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESS OF PLASMA UPDATE A WORKING OF CUTTING TOOL

Formulated conditions for the pilot study of the effect of process parameters on the micro hardness plasma modification of the working of the cutting tool.

Plasma modification process, cutting tools, design of experiments, the micro hardness

Исследования работоспособности режущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда, в условиях реального производства [1] позволили констатировать, что их результаты не всегда являются однозначными. Наряду с увеличением времени стойкости имеют место ситуации, в которых происходят поломки инструмента по различным причинам, часть из которых является следствием существенного разброса оценок микротвердости модифицированной поверхности, особенно в приповерхностных слоях. В связи с этим актуальным является экспериментальное исследование воздействия низкотемпературной плазмы на поверхность режущей части инструмента с целью получения исходных данных:

- для оценки возможности использования микротвердости в качестве интегрального показателя эффективности процесса воздействия;
- для оптимизации процесса воздействия по критерию получения максимально возможного значения микротвердости.

В постановочном плане это является типичными задачами планирования эксперимента и предполагает последовательное выполнение ряда этапов, наиболее важными из которых в данном случае являются выбор входных и выходных переменных, области экспериментирования (диапазонов изменения входных переменных), математической модели, с помощью которой будут представляться экспериментальные данные и плана эксперимента [2].

Входные переменные (обычно их называют факторами) определяют ход и результат эксперимента. Главное требование к ним – управляемость, под которой понимается установление нужного значения фактора (уровня) и поддержание его в течение всего опыта (в этом состоит особенность активного эксперимента). В данном случае этими факторами, под действием которых происходит процесс плазменной модификации, являются:

- площадь обрабатываемой поверхности;
- потенциал смещения – подаваемое на расположенный в вакуумном пространстве инструмент положительное напряжение, которое формирует вокруг него электростатическое поле;
- подводимая СВЧ мощность – накладываемое на электростатическое поле сверхвысокочастотное электромагнитное поле;
- координаты положения обрабатываемой части инструмента в рабочей камере, определяемые его габаритными размерами.

Анализируя факторы, можно сказать, что вид и степень их влияния зависят того, инструмент какого класса подвергается модификации. В частности влияние первых трех факторов для любого инструмента можно принять независимым и линейным, поскольку изменение величины нагрева рабочей части инструмента, как результата воздействия на нее низкотемпературной плазмы, при изменении этих факторов является линейным [3]. Влияние четвертого фактора при обработке пластин можно исключить фиксацией их положения в рабочей камере плазменной установки, что обеспечит воспроизводимость результатов опытов. Для осевого инструмента (сверла, метчики, концевые фрезы) влияние исключить нельзя, поскольку его габаритные размеры изменяются в широком диапазоне. Кроме того, поскольку подводимая в камеру СВЧ энергия формирует стоячие волны в резонаторе и создает в разных точках различную напряженность СВЧ поля, изменение размеров приводит к изменению напряженности вблизи поверхности инструмента, что эквивалентно изменению уровня СВЧ-мощности. Последнее является особенно важным, поскольку расположение обрабатываемой части инструмента в зонах с более высо-

кой напряженностью СВЧ поля и уровень подводимой СВЧ мощности оказывает существенное влияние на температуру a , следовательно, степень нагрева рабочей части инструмента. Это означает, что помимо независимого необходимо учесть и взаимное влияние подводимой СВЧ мощности и координаты положения обрабатываемой части инструмента на результат процесса модификации введением дополнительного (пятого) фактора, представляющего собой их произведение.

Диапазон значений площади обрабатываемой поверхности для пластин определяется их геометрией, а для осевого инструмента – его габаритными размерами (диаметром и длиной).

Диапазон значений потенциала смещения выбирается таким образом, чтобы сформированное вокруг инструмента электростатическое поле было способно поддерживать устойчивую генерацию плазмы.

Диапазон значений подводимой в зону обработки СВЧ мощности выбирается таким образом, чтобы обеспечить условия для возникновения у обрабатываемого инструмента ряда низкотемпературной плазмы пониженного давления.

Микротвердость как выходная переменная процесса плазменной модификации представляет собой отклик материала рабочей части инструмента (повышение его прочности) на воздействия входных переменных и, являясь параметром оптимизации, должна выражаться одним числом, легко измеряться, быть однозначной и статистически эффективной. Однозначность характеризует ситуацию, в которой каждому различимому результату процесса плазменной модификации должно соответствовать одно, а не несколько значений микротвердости. Требование статистической эффективности предполагает, что число различимых результатов процесса плазменной модификации должно быть максимально возможным, чтобы их можно было различить. В связи с этим необходимо сказать следующее.

Объективно существующая неоднородность структуры поверхностного слоя рабочей части инструмента, а также наличие или отсутствие упрочняющего покрытия приводят к тому, что повышение прочности поверхностного слоя после операции плазменной модификации, как результат уменьшения объема материала в слое за счет уплотнения его структуры, происходит в различной степени. В этой ситуации максимум микротвердости является лишь частным, а не интегральным показателем эффективности процесса модификации, поскольку характеризует изменение свойств материала только в определенной области поверхностного слоя. Для того чтобы максимум стал интегральным показателем необходимо определять его по результатам абсолютных измерений микротвердости не только модифицированной, но и исходной поверхности как разность между значениями их максимумов, т.е. как приращение максимума. В качестве дополнительного аргумента в пользу такой содержательной трактовки добавим, что величина приращения максимума является отображением так называемого наноразмерного эффекта, т.е. получения близкого к оптимальному значения среднего размера элемента модифицированной зеренной структуры материала. Соответствующий этому размеру максимум микротвердости модифицированной поверхности будет близким к абсолютному (рис.1), поскольку дальнейшее уменьшение среднего размера зерна приводит к возникновению ротационного эффекта – проскальзывания по межзеренным границам – и микротвердость начинает снижаться [4].

Поиск максимумов определяет необходимость использования метода, в соответствии с которым измерения микротвердости выполняются после приложения к исходной или модифицированной поверхности в течение фиксированного времени переменной нагрузки грузами различной массы (не менее трех), т.е. на различной глубине поверхностного слоя. Измерения при каждой нагрузке выполняются не менее двух раз с целью последующего усреднения для увеличения точности получаемых оценок.

Выбор модели, с помощью которой будут представляться результаты эксперимента, зависит от содержания решаемой с ее помощью задачи. Задача оптимизации процесса плазменной модификации определяет необходимость выбора модели, которая будет эффективно предсказывать направление наискорейшего возрастания микротвердости модифицированной поверхности. Это позволит избежать полного перебора ее возможных значений и тем самым уменьшить коли-

чество опытов, необходимых для отыскания максимума, но выдвигает требование знания свойств поверхности отклика, которая определяется видом функции отклика $\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_5)$, где x_1, x_2, \dots, x_5 – факторы. В нашем случае вид этой функции неизвестен, однако обоснованный ранее характер влияния факторов на значения отклика позволяет задать ее в виде отрезка степенного ряда – алгебраического полинома вида :

$$\eta = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

который можно построить в окрестностях любой точки факторного пространства.

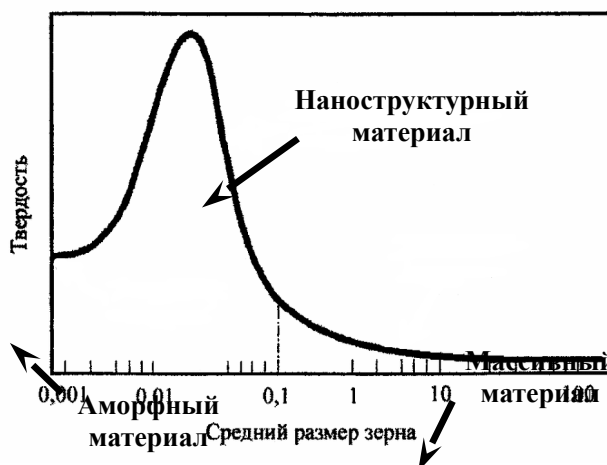


Рис.1. Зависимость твердости материала от среднего размера зерна

Оценив по результатам эксперимента параметры полинома, можно использовать его в качестве модели процесса плазменной модификации, которая для пластин будет иметь вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3, \quad (2)$$

т.е. модели первой степени, а для осевого инструмента:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{3,4} x_3 x_4, \quad (3)$$

т.е. модели первой степени с эффектом взаимного влияния (или парного взаимодействия).

Полученные модели служат основой выполнения заключительного этапа процедуры планирования эксперимента – выбора плана его проведения. Дополнительным условием выбора является минимизация числа опытов, необходимых для получения статистически достоверных результатов, поскольку это позволит сократить количество потребного для их проведения инструмента.

Наиболее часто в прикладных исследованиях применяются так называемых простые двухуровневые планы, в соответствии с которыми при проведении опытов значения факторов изменяются на двух закодированных уровнях, симметричных относительно основного уровня; один из них – верхний (+1), другой – нижний (-1). Эксперимент при этом носит название полного факторного (ПФЭ), поскольку в нем реализуются все возможные сочетания уровней факторов, а его план носит название плана типа 2^k , где k – число факторов [2, 5]. Условия эксперимента представляются в виде таблицы – матрицы планирования, строки которой соответствуют различным опытам, а столбцы – значениям факторов. Порядок проведения опытов является случайным для компенсации систематической ошибки.

Нетрудно увидеть, что для пластин ПФЭ требует реализации $2^3 = 8$, а для осевого инструмента – $2^4 = 16$ процессов плазменной модификации, что связано со значительными временными затратами как на их подготовку и проведение, так и на измерения микротвердости исходных и модифицированных поверхностей. Кроме этого может проявиться так называемый эффект неконтролируемого временного дрейфа, связанный с изменением условий проведения модификации. В связи с этим для минимизации числа опытов воспользуемся дробным факторным экспериментом (ДФЭ), который применяется для решения задач

локального описания участков поверхности отклика полиномами первой степени и описания процессов, в которых заведомо не могут иметь место хотя бы некоторые из парных взаимодействий. В нашем случае для пластин эффекты парного взаимодействия отсутствуют, поэтому можно реализовать ДФЭ 2^{3-1} , оценив с его помощью коэффициенты b_0 , и три коэффициента при линейных членах модели (2). При этом линейные оценки основных эффектов (факторов) смешиваются с оценками их взаимных влияний:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}, b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}, b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12}, \quad (4)$$

откуда следует, что, во-первых, все основные факторы (эффекты) оцениваются отдельно друг от друга, во-вторых, $b_1 \approx \beta_1, b_2 \approx \beta_2, b_3 \approx \beta_3$, поскольку эффекты парных взаимодействий равны нулю.

Матрица ДФЭ 2^{3-1}

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	\hat{y}
1	+1	-1	-1	+1	\hat{y}_1
2	+1	+1	+1	+1	\hat{y}_2
3	+1	-1	+1	-1	\hat{y}_3
4	+1	+1	-1	-1	\hat{y}_4

представляет собой полуреплику от ПФЭ 2^3 и показывает, что вместо восьми оказывается возможной постановка только четырех опытов, т.е. плазменная модификация 4 инструментов.

Для исследования процесса модификации осевого инструмента ДФЭ необходимо планировать таким образом, чтобы оценить эффект парного взаимодействия x_3x_4 в модели (3). Сделать это можно, приняв $x_4 = x_1x_2$ и сформировав полуреплику 2^{4-1} . Это даст систему оценок

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{24}, b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{14}, b_3 \rightarrow \beta_3, b_4 \rightarrow \beta_4 + \beta_{12}, \quad (5)$$

$$b_{34} \rightarrow \beta_{34}, b_{13} \rightarrow \beta_{13}, b_{23} \rightarrow \beta_{23},$$

в которой взаимодействие x_3x_4 оценивается отдельно.

Матрица ДФЭ 24-1

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_3	x_2x_3	x_3x_4	\hat{y}
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	\hat{y}_1
2	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	\hat{y}_2
3	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	\hat{y}_3
4	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	\hat{y}_4
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	\hat{y}_5
6	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	\hat{y}_6
7	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	\hat{y}_7
8	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	\hat{y}_8

определяет необходимость проведения плазменной модификации 8 инструментов.

В заключение отметим, что положительным моментом использования ДФЭ с репликами, позволяющими сократить число опытов в 2^m раз, $m = 1, 2, 3, \dots$, является простота оценки параметров моделей (2) и (3), так же как и при использовании ПФЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бржозовский Б.М. Упрочнение режущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина. Саратов: СГТУ, 2009. 176 с.

2. Адлер Ю.П. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. М.: Наука, 1976. 280 с.

3. Бржозовский Б.М. Математическое обеспечение процесса формирования наноструктурированной режущей части инструмента в низкотемпературной плазме комбинированного разряда / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. №1(53). С. 7-14.

4. Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровов для применения в инструментальном производстве // Проблемы и перспективы обработки материалов и заготовительных производств: материалы междунар. науч.-техн. конф. и междунар. симпозиума «Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы» в 5 т. Т.2. Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО КнаГТУ, 2010. С. 9-20.

5. Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. М.: Наука, 1965. 340 с.

Бржозовский Борис Максович –
Заслуженный работник высшей школы
РФ, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Конструирование
и компьютерное моделирование
технологического оборудования
в машино- и приборостроении» (КиМО)
Саратовского государственного
технического университета

Brzhozovsky Boris Maxovich –
honored worker higher education of Russian
Federation, doctor of technical sciences,
professor, head of sub-faculty «Design
and computing aided simulation
of a processing environment of machine-
and device building» (DaME) Saratov state
technical university named after U. Gagarin
(SSTU)

Мартынов Владимир Васильевич –
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры КиМО СГТУ.

Martynov Vladimir Vasilievich –
doctor of technical sciences, professor,
professor of sub-faculty DaME SSTU.

Зинина Елена Петровна –
кандидат технических наук, докторант
кафедры КиМО СГТУ.

Zinina Helena Petrovna –
candidate of technical sciences, doctoral stu-
dent of sub-faculty DaME SSTU.

Стариннова Виктория Олеговна –
аспирант кафедры КиМО СГТУ.

Starinnova Viktoriya Olegovna –
graduate student of sub-faculty DaME SSTU.

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 629.113

С.А. Гребенников, А.С. Гребенников, Д.В. Федоров

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЗМА ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Приведены данные о неравномерности изменения технического состояния одноименных элементов механизма газораспределения двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в процессе эксплуатации.

Неравномерность, износ, двигатель внутреннего сгорания, газораспределительный механизм

S.A. Grebennikov, A.S. Grebennikov, D.V. Fedorov

THE IRREGULARITY OF TECHNICAL CONDITION CHANGE OF ENGINE GAS-DISTRIBUTING MECHANISM ELEMENTS'

Set out the irregularity of technical condition change of engine gas-distributing mechanism elements'.

Wear, internal-combustion engine, gas-distributing mechanism

Механизм газораспределения (МГР) является одним из ключевых устройств современного автотракторного ДВС, конструкция которого во многом определяет технический уровень и потребительские свойства ДВС. Работа его элементов осуществляется в условиях высоких динамических нагрузок, тепловых и коррозионных воздействий. На долю МГР приходится более 25% отказов и неисправностей, свыше 7% суммарной трудоёмкости технического обслуживания и ремонта ДВС [1, 2].

Эффективность работы МГР определяется параметрами «время-сечение» клапанов и мощностью, затрачиваемой на привод, а его надежность - износостойкостью деталей, неразрывностью их кинематических связей, герметичностью сопряжений «седло-клапан».

Как и большинство одноименных элементов автомобиля, относящихся к динамически нагруженному классу сопряжений, детали механизма газораспределения (МГР) в процессе эксплуатации изнашиваются неравномерно в соответствии с экспоненциальной зависимостью изменения структурных параметров S от пробега l [1]

$$S = S_0 \cdot e^{bl} \quad (1)$$

где S_0 – значение структурного параметра после этапа приработки; b – коэффициент интенсификации изнашивания.

Неравномерность изменения технического состояния одноименных сопряжений обусловлена, прежде всего, неоднородностью материала деталей, погрешностями изготовления (отклонения шероховатости, геометрических размеров и формы в пределах допуска) и сборки. Поэтому, ужесточение требований к точности и идентичности изготовления, качеству сопрягаемых поверхностей и сборки элементов всех звеньев МГР [1, 2] является залогом равноизносности одноименных деталей.

Сравнительный анализ конструкций, технологий изготовления и сборки МГР двигателей отечественных и зарубежных фирм показывает, что у ДВС отечественного производства имеются резервы позволяющие увеличить в 1,5...2 раза его надежность и периодичность технических воздействий по обслуживанию МГР. К примеру, сходные по устройству МГР двигателей автомобиля Ford Focus и отечественного автомобиля ВАЗ переднеприводной компоновки с непосредственным воздействием кулачка распределительного вала на толкатель клапана цилиндрической формы имеют периодичность регулировки зазора соответственно 140 000 [3] и 30 000 км соответственно. При этом единственным конструктивным отличием двух механизмов является регулировочная шайба (рис. 1) имеющаяся в МГР ВАЗа и отсутствующая в ДВС Ford. Клапанный зазор МГР ДВС Ford регулируется заменой всего толкателя, толщина которого изменяется с шагом 0,025 в отличие от ВАЗовской шайбы с шагом 0,05, что позволяет с большей точностью уложиться в допуск на величину зазора между кулачком и толкателем, а соответственно уменьшить исходную неравномерность зазоров. Отсутствие регулировочной шайбы позволяет обойтись двумя сопряжениями (кулачек-толкатель и толкатель клапан) вместо трех у МГР двигателя ВАЗ (кулачек-шайба, шайба-толкатель и толкатель клапан), что устраняет возможный износ, присущий данному сопряжению, а соответственно и изменение теплового зазора вызванное данным износом.

В данной статье вскрыты некоторые причины, влияющие на неравномерность изменения технического состояния одноименных элементов МГР ДВС, и приведены результаты исследования МГР двигателя автомобиля Ford Focus объемом 1600 см³, имеющего пробег 75000 км. Ранее [1, 2] были опубликованы аналогичные данные по отечественным ДВС.

Методика экспериментальных исследований предусматривала измерение одноименных деталей ДВС электронными инструментами фирмы «GRIFF» (Россия): микрометрами МК-25, МК-50, МК-75 с точностью 0,001 мм и диапазоном измерения 0...25 мм, 25...50 мм, 50...75 мм соответственно; штангенциркулем ШЦЦ-1 с точностью 0,01 мм и диапазоном 0...300 мм. Все измерения выполнялись при комнатной температуре (20...25°C).

При комплексной оценке технического состояния одноименных элементов двигателя учитывались значения: износа деталей по отношению к номинальным их размерам с учетом допуска на их изготовление; коэффициента неравномерности их износа [1]

$$\delta = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{\sum_{i=1}^4 \bar{h}_i} \quad (2)$$

где h_{\max} , h_{\min} – соответственно значения максимальной и минимальной величины структурного параметра; \bar{h}_i – среднеарифметическое значение структурного параметра.

При проверке состояния деталей двигателя особое внимание уделено элементам МГР, его приводу и другим деталям, способным оказать то или иное влияние на техническое состояние МГР (например свечам зажигания).

Существует мнение, отчасти подтвержденное научными исследованиями, что ориентирование определенным образом боковых электродов свечей зажигания относительно клапанных гнезд камеры сгорания способствует достижению максимальной равномерности и эффективности процесса сгорания в цилиндрах двигателя. Считается, что свеча зажигания установлена оптимально, если её боковой электрод направлен в сторону «выпускных» клапанов, при этом он не экранирует искру от смеси и не отражает фронт горения на пути его распространения от свечи во внутрь камеры сгорания.

К сожалению, при современном массовом производстве нет уверенности в том, что вкрученная свеча окажется правильно сориентированной. Как видно из рис. 2 у исследуемого двигателя правильное положение имеет только свеча зажигания I цилиндра. Свечи остальных цилиндров сориентированы по-разному и это может являться одной из причин столь сильного нагара на тарелках клапанов III и IV цилиндров и неравномерности рабочих процессов в цилиндрах. Кроме того, было обнаружено, что маслосъемные колпачки клапанов II, III, IV цилиндров имеют предельный износ в отличие от колпачков I цилиндра, находящихся в хорошем состоянии.

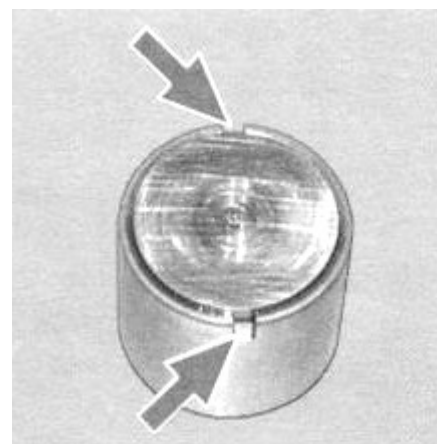
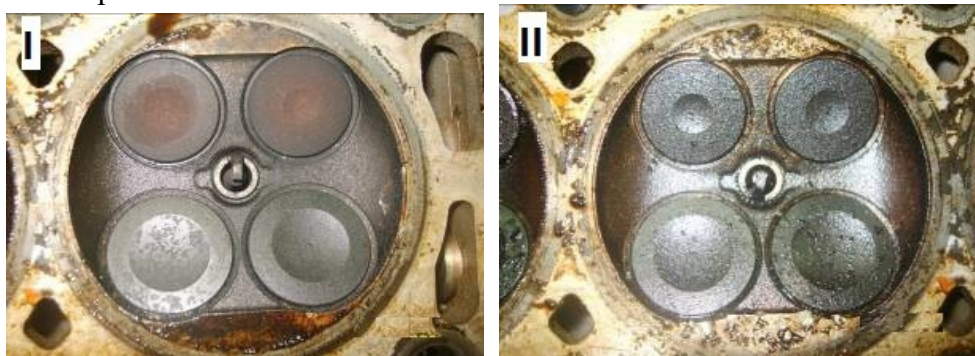


Рис. 1. Толкатель МГР двигателя ВАЗ 2109 с регулировочной шайбой



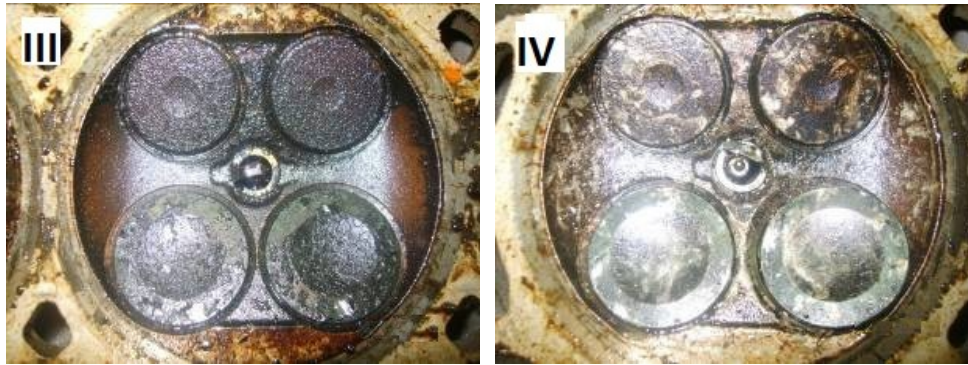


Рис. 2. Внешний вид состояния тарелок клапанов и ориентации электродов свечей зажигания по цилиндрам (выпускные клапана меньшего диаметра): I...IV – номера цилиндров

Поскольку износ деталей пропорционален нагрузке в паре трения, то различия в упругости клапанных пружин вызывает неравномерное изнашивание сопряжений МГР. Техническое состояние клапанных пружин МГР оценивалось по их деформации в процессе эксплуатации – длине в свободном состоянии [1]. Операции измерения штангенциркулем ШЦЦ-1 длин клапанных пружин в свободном состоянии показаны на рис. 3, а результаты обработки полученных данных – в таблице 1.

При комплексной оценке технического состояния клапанных пружин одного двигателя учитывалось как изменение их длин по отношению к номинальным размерам и допуску на их изготовление, так и значение коэффициента неравномерности их деформации (2)

Таблица 1

Результаты измерений длины клапанных пружин всех цилиндров в свободном состоянии

Пружины клапанов	Номера цилиндров				h_{cp} , мм	$h_{max} - h_{min}$, мм	δ
	I	II	III	IV			
Впускного 1	47,11	46,72	46,64	46,70	46,79	0,47	0,01
Впускного 2	46,65	47,03	46,55	46,82	46,76	0,48	0,01
Выпускного 1	46,62	46,81	46,83	46,75	46,75	0,21	0,0045
Выпускного 2	46,90	46,70	46,77	46,74	46,77	0,20	0,0043

Примечание: h_{max} , h_{min} , \bar{h}_i – соответственно значения максимальной, минимальной среднеарифметической длины клапанных пружин в свободном состоянии.





Рис. 3. Измерение длины клапанных пружин МГР I цилиндра в свободном состоянии

Из таблицы 1 видно, что максимальный разброс значений длин всех клапанных пружин в свободном состоянии равен 0,56 мм (47,11 – 46,55) при допустимом отклонении 0,75 мм [3]. Однако пружины впускных клапанов имеют в два раза большую величину коэффициента неравномерности по сравнению с пружинами выпускных клапанов (0,012 против 0,006), что, возможно, объясняется необходимостью большего усилия предварительного сжатия пружин выпускного клапана. Графическая интерпретация результатов измерения длины клапанных пружин в свободном состоянии исследуемого ДВС отображена на рис. 4.

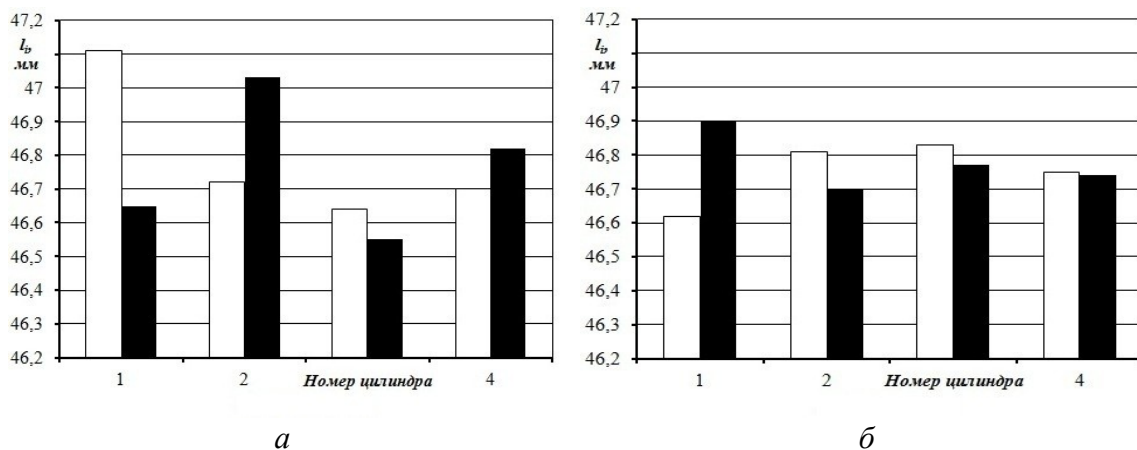


Рис. 4. Неравномерность изменения свободной длины пружин l_s впускных (а) и выпускных (б) клапанов МГР (по цилиндрам) в процессе эксплуатации:
 □ – впускной 1, выпускной 1; ■ – впускной 2, выпускной 2

Исходная неравномерность усилия клапанных пружин обусловлена допуском на диаметр проволоки пружины клапана, величина которого находится в пределах 2,77 – 2,83 мм [3] (разброс в 2%), при том, что в расчете параметров пружины [4] диаметр проволоки возводится в 4-ю степень, что при пересчете дает разницу в необходимом числе витков пружины почти на 9%. По техническим условиям изготовления клапанных пружин число рабочих витков фиксировано 7,2 витками [3].

Техническое состояние стержней клапанов определялось по величинам максимального износа их диаметра, а идентичность износоустойчивости – по коэффициенту неравномерности износа. Фрагменты измерения значений диаметра клапанных стержней представлены на рис. 5, а результаты обработки экспериментальных данных – в таблице 2.



Рис. 5. Измерение диаметра стержней клапанов МГР I цилиндра

Таблица 2

Значения диаметров стержней клапанов МГР и коэффициента неравномерности их износа

Стержни клапанов	Номера цилиндров				h_{cp} , мм	$h_{max} - h_{min}$, мм	δ
	I	II	III	IV			
Впускного 1	5,477	5,475	5,479	5,477	5,477	0,004	0,000730
Впускного 2	5,479	5,478	5,478	5,480	5,478	0,002	0,000365
Выпускного 1	5,477	5,470	5,482	5,473	5,475	0,012	0,00220
Выпускного 2	5,470	5,477	5,481	5,473	5,475	0,011	0,00201

Значения диаметра стержней клапанов находятся в диапазоне от 5,470 до 5,482 мм и соответствуют номинальному их размеру (допуск на изготовление диаметра стержня клапана $D_{НОМ} = 5,470...5,485$ мм). По результатам измерения построены гистограммы распределения диаметров стержней клапанов после пробега 75 тыс. км (рис. 6). Отмечено, что стержни выпускных клапанов имеют значительно больший коэффициент неравномерности износа по сравнению с впускными клапанами, что объясняется большей тепловой нагрузкой на выпускные клапана, а соответственно изменением условий трения ввиду большей пластичности металла клапана и ухудшением смазывающей способности моторного масла. Это подтверждается тем фактом, что наибольшую величину износа имеют выпускные клапаны II и III цилиндров (с номерами соответственно 2 и 1), которые находятся в самом центре ДВС и имеют наихудшие возможности по рассеиванию теплоты. Высокой неравномерностью износа отличаются стержни выпускных клапанов I и II цилиндров (табл. 2), два из которых имеют предельно-допустимые размеры (5,470 мм).

Оценку технического состояния распределительных валов для впускных и выпускных клапанов осуществляли по результатам измерения диаметров опорных шеек (рис. 7, 8). Результаты измерения представлены в таблице 3.

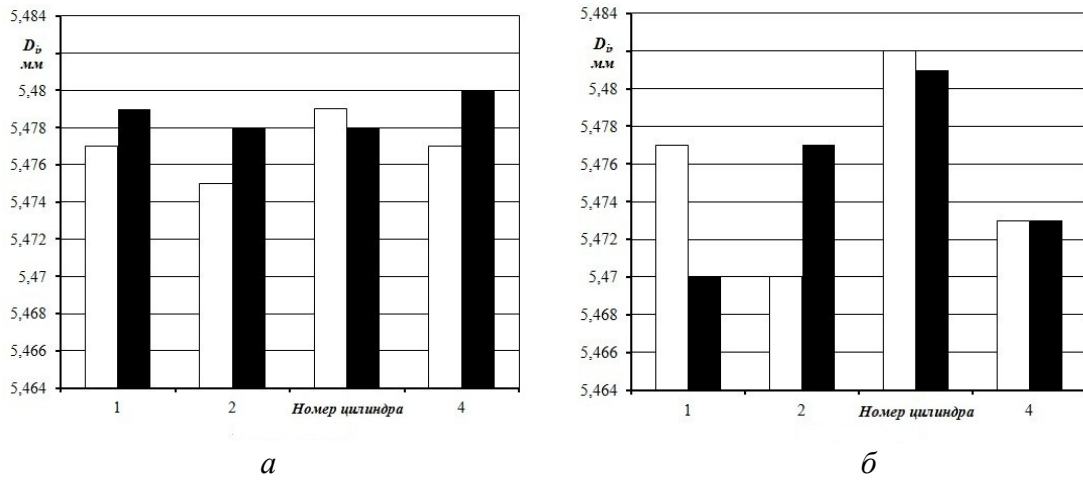


Рис. 6. Неравномерность изменения диаметров стержней D_v впускных (а) и выпускных (б) клапанов МГР (по цилиндрам) в процессе эксплуатации:
на рис. 6, а : □ – впускной 1, ■ – впускной 2; на рис. 6, б □ - выпускной 1; ■ выпускной 2



Рис. 7. Измерение диаметров опорных шеек распределительных валов МГР

Таблица 3

Износы диаметра шеек и выпускного распределительных валов

Вал	Номера шеек					h_{cp} , мм	$h_{max} - h_{min}$, мм	δ
	1	2	3	4	5			
Впускной	24,968	24,965	24,964	24,964	24,966	24,9654	0,004	0,0001602
Выпускной	24,968	24,967	24,965	24,969	24,968	24,9674	0,004	0,0001602

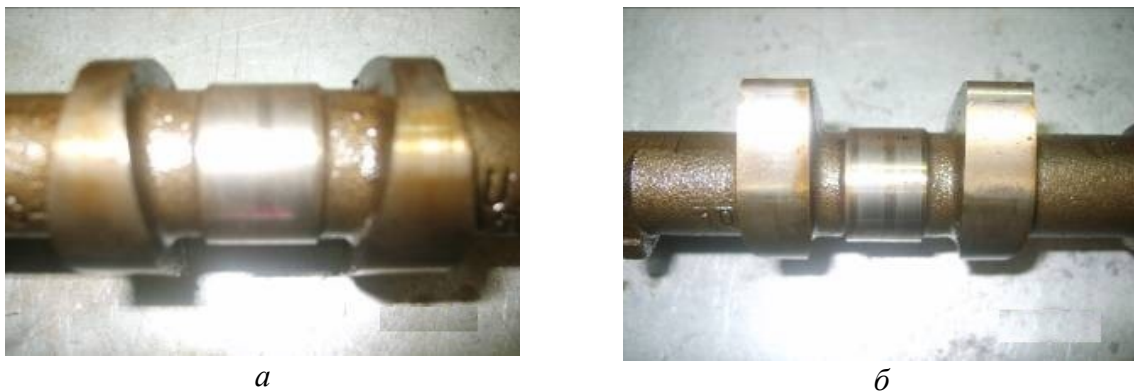


Рис. 8. Внешний вид шейки (а) и кулачков (б) распределительного вала со следами износа

По результатам измерения износов диаметров шеек распределительных валов (таблица 3) и полученной гистограммы (рис. 9) неравномерности изменения их диаметра можно сделать вывод, что наибольший износ имеют 3-я и 4-я шейки впускного, и 3-я шейка выпускного распределительного вала. На неравномерность изнашивания шеек распределительного вала оказывает влияние жесткость клапанных пружин, пульсации подводимого моторного масла, радиальная сила, возникающая от натяжения приводного ремня (цепи), порядок работы цилиндров и исходная неравномерность зазоров в подшипниках МГР.

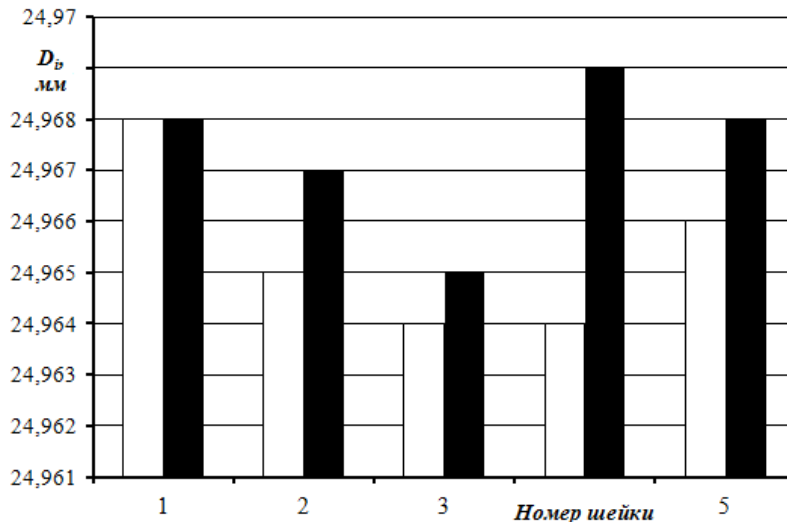


Рис. 9. Неравномерность изменения диаметра D_i шеек впускного и выпускного распределительных валов МГР по цилиндрам после пробега 75000 км:

□ – шейки впускного распределительного вала; ■ – шейки выпускного распределительного вала

Однако распределительные валы пригодны к эксплуатации, поскольку по геометрическим параметрам укладываются в допуск, установленный заводом изготовителем ($D_{НОМ} = 24,97 \pm 0,01$ мм). По результатам измерения видно, что шейки впускного и выпускного вала имеют одинаковые значения как износа по абсолютной величине, так и коэффициента их неравномерности.

Результаты исследования подтверждают:

- взаимосвязь неравномерности изнашивания одноименных элементов МГР с ресурсом ДВС и с рядом факторов как конструктивного, так и эксплуатационного характера, что указывает на актуальность тематики исследования;
- необходимость учета неравномерности изменения технического состояния элементов МГР при назначении периодичности ТО и ТР ДВС, а также при проектировании новых моделей ДВС;
- существующую потребность в создании оперативных средств диагностирования неравномерности технического состояния одноименных элементов МГР и других механизмов и систем автомобиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гребенников А. С. Диагностирование автотракторных двигателей динамическим методом / А. С. Гребенников. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. 196 с.
2. Гребенников А. С. Зависимость ресурса одноимённых элементов конструкции автомобиля от условий их функционирования / А. С. Гребенников, С. А. Гребенников, А. В. Коновалов, А. В. Косарева // Автомобильная промышленность. 2007. № 10. С. 24-26 (начало статьи); № 11. С. 19-22 (продолжение статьи).
3. FORD FOCUS. Устройство. Эксплуатация. Обслуживание. Ремонт. М.: Издательство «За рулём», 2010. 344 с.

4. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Высш. школа, 1980. 400 с.

Гребенников Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и двигатели» Саратовского государственного технического университета

Grebennikov Sergey Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of «Cars and Engines» of Saratov State Technical University

Федоров Дмитрий Викторович – аспирант кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета

Fedorov Dmitrei Viktorovich – Post-graduate Student of the Department of «Cars and Automobile Facilities» of Saratov State Technical University

Гребенников Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета

Grebennikov Aleksandr Sergeevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Cars and Automobile Facilities» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.9.015:629.12.002

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

О ВЛИЯНИИ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ ДИСКРЕТНОГО ВИБРАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ НА ОБЪЕМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

Рассматривается процесс образования частично регулярного микро-рельефа на поверхности деталей. Получены характеристики для оценки нестандартных параметров микро-рельефа.

Частично регулярный микро-рельеф, параметры микро-рельефа, дискретное вибрационное резание

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

EFFECT OF THE MAIN FACTORS DISCRETE VIBRATION CUTTING FOR VOLUME DATA SURFACE MICRORELIEF

It is considered formation of a partly regular microrelief on the surface of parts. The characteristics for the evaluation of non-standard parameters of the microrelief.

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

Технологический микро-рельеф поверхностей деталей оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики деталей приборов и машин, в том числе на прира-

бываемость, трение и износостойкость трущихся пар, плавность хода, герметичность, пылеудаляемость и другие [1], поэтому важной задачей в области качества поверхности является изыскание и исследование методов обработки деталей, обеспечивающих получение на их поверхностях регулярных микрорельефов. К таким методам относится дискретное вибрационное резание (ДВР), позволяющее получать частично регулярный микрорельеф (ЧРМР) на поверхностях деталей тел вращения в виде дискретно расположенных серповидных микролунок [2, 3].

Ранее получены формулы для оценки таких параметров частично регулярного микрорельефа, как объем микролунок, удельный объем микролунок и коэффициент объемного заполнения [4]:

$$V = \frac{4\pi d_s}{9i} H \cdot \sqrt{2rH}, \quad (1)$$

где $i = n_{\text{об.с}} / n_s$ – число циклов осцилляции резца за один оборот заготовки; d_s – диаметр обрабатываемой поверхности; H – максимальная глубина микролунок (стандартизированный параметр ЧРМР); r – радиус резца.

При этом удельный объем микролунок, т.е. отношение объема микролунок к площади боковой поверхности идеального цилиндра равен:

$$v_k = \frac{4H \cdot \sqrt{2rH}}{9 \cdot S_{\text{об}}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{об}}$ – продольная подача.

А коэффициент объемного заполнения:

$$K_v = 1 - \frac{4\sqrt{2rH}}{9S_{\text{об}}}. \quad (3)$$

На основании полученных формул были построены характеристики нестандартных параметров микрорельефа (рис. 2, 3, 4).

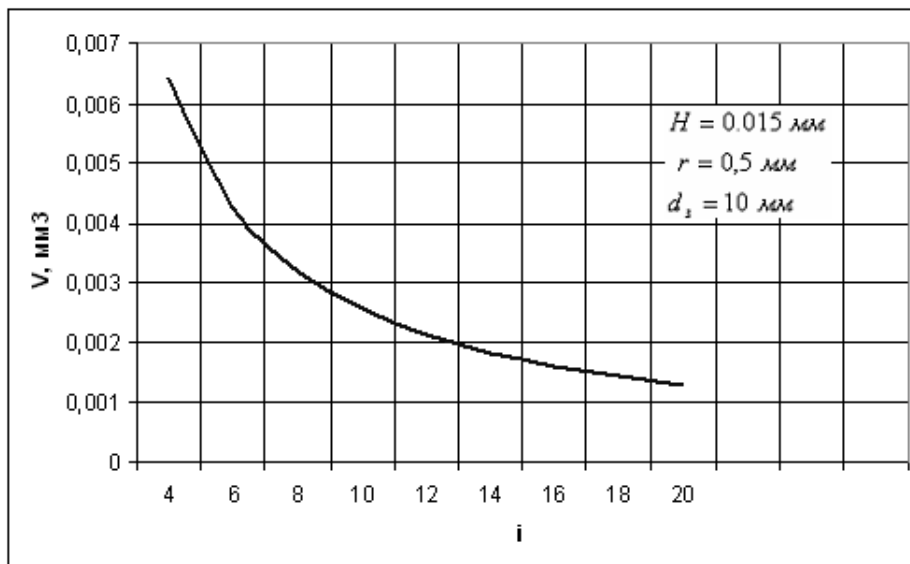


Рис. 2. Зависимость объема от числа циклов осцилляции резца

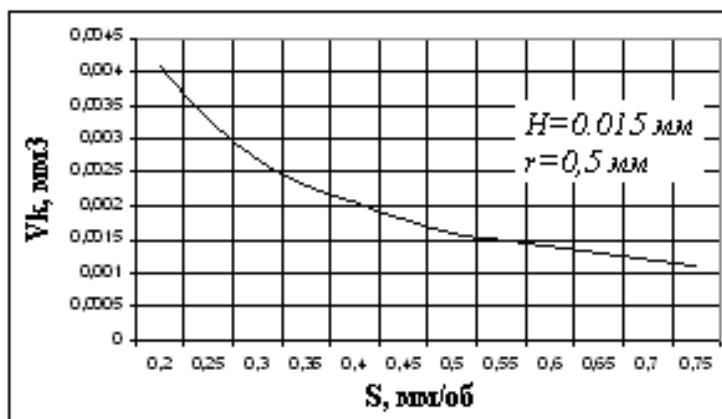


Рис. 3. Зависимость удельного объема от продольной подачи инструмента

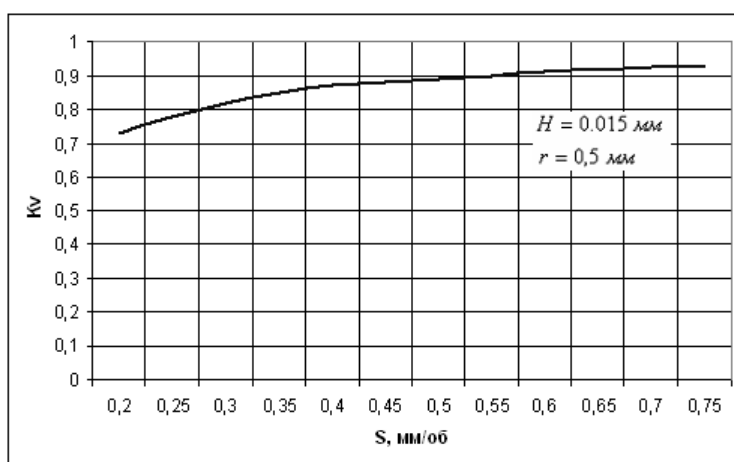


Рис. 4. Зависимость коэффициента объемного заполнения от продольной подачи инструмента

Удельный объем масляной канавки характеризует степень обеспеченности поверхности смазкой, т.е. ее маслоемкость. А коэффициент объемного заполнения показывает величину соотношения объемов металла и пустот в поверхностном слое, что влияет на эксплуатационные свойства поверхностей (износостойкость, теплопроводность и др.).

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. Авторское свидетельство СССР № 1232491. Способ образования регулярного микрорельефа / Б.С. Орлов, А.Д. Пустовойтов, В.И. Солдатов. Б.И. №19, 1986.
3. Патент на полезную модель №71813. Устройство для вибрационной обработки поверхностей / Б.С. Орлов, В.И. Орлов, Д.В. Черепанов, А.А. Скрипкин. Бюл. №32, 20.11.2008.
4. Ермольчева Н.В. Устройство для дискретного вибрационного резания с созданием регулярного микрорельефа с требуемыми параметрами / Н.В. Ермольчева, А.В. Королев, Б.С. Орлов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 2 (56) С. 52-57.

машиностроения» Саратовского государственного технического университета

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

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

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

of mechanical engineering» Saratov State Technical University

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

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

Rodionov Igor Vladimirovich – doctor of technical sciences, professor of «Technology of mechanical engineering» Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.9.015:629.12.002

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

О ВЛИЯНИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДИСКРЕТНОГО ВИБРАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ НА ФОРМУ И ПАРАМЕТРЫ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

Рассматривается процесс образования частично регулярного микро- рельефа на поверхности деталей методом дискретного вибрационного ре- зания. Получены формулы для оценки нестандартных параметров микро- рельефа.

Частично регулярный микро-рельеф, форма микро-рельефа, параметры микро-рельефа, дискретное вибрационное резание, технологическое обеспе- чение

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

EFFECT OF STRUCTURAL ELEMENTS OF DISCRETE DEVICES FOR VIBRATION CUTTING SHAPE AND PARAMETERS OF SURFACE MICRORELIEF

It is considered process of the formation partly regular microrelief on surfaces of the details by method of the discrete vibratory cutting. The formulas for the evaluation of non-standard parameters of the microrelief.

Partly regular microrelief, form microrelief, parameters of the microrelief, discrete vibratory cutting, technological provision

Известно, что технологический микрорельеф поверхностей деталей оказывает влияние на их эксплуатационные характеристики. Одним из новых методов нанесения микрорельефов на поверхностях деталей тел вращения является дискретное вибрационное резание (ДВР), позволяющее создавать частично регулярный микрорельеф (ЧРМР) в виде различной формы и размеров дискретно расположенных микролунок глубиной h_{max} с относительной площадью F_n по ГОСТ 24773-81 [1, 2].

На рисунке 1 видно, что инструмент (резец), закрепленный на Г-образной части державки и совершающий возвратно-качательное движение относительно оси O с амплитудой e , заглубляется на величину h_{max} в момент наибольшего отклонения его от положения равновесия на угол φ . При этом время соприкосновения инструмента с поверхностью зависит от размеров L и l конструктивных элементов державки, а также амплитуды e и глубины h_{max} .

Если при $l=e$ (рис. 1б) инструмент соприкасается с поверхностью в течение полупериода $T/2$, то при $l>e$ (рис. 1а) за время τ_0 прохождения расстояния y_0 он дополнительно находится вне контакта с поверхностью, то есть соприкосновение происходит в течение времени $(T/2-2\tau_0)$.

Так как инструмент совершает гармонические колебания, то время τ_0 можно определить из выражения:

$$y_0 = e \sin \frac{2\pi}{T} \tau_0. \quad (1)$$

На основании подобия фигур B_1CM и B_1BN (рис. 1б) следует, что

$$y_0 = B_1M = B_1N \cdot \frac{CM}{BN}, \quad (2)$$

где $B_1N = l - (l \cdot \cos \varphi - e)$; $BN = l \cdot \sin \varphi - (L - L \cdot \cos \varphi)$; $CM = l \cdot \sin \varphi - h_{max}$.

Поскольку $\sin \varphi = e/L$ и с учетом того, что при $L \gg e \cos \varphi \approx 1$, уравнение (2) примет вид:

$$y_0 = e - \frac{L \cdot h_{max}}{l}. \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в формулу (1), получим

$$\tau_0 = \frac{T}{2\pi} \arcsin \left(1 - \frac{L \cdot h_{max}}{e \cdot l} \right). \quad (4)$$

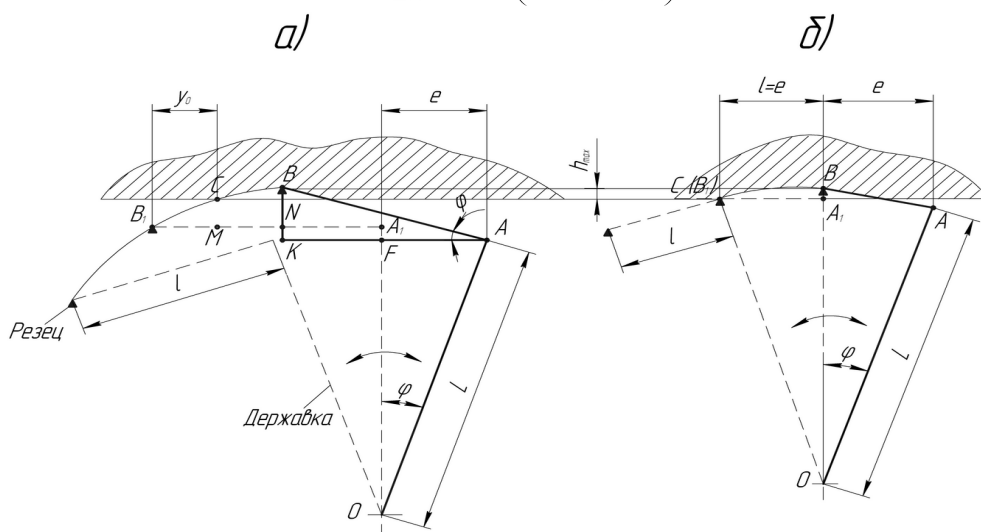


Рис. 1. Схема формирования микролунок при $l>e$ (а) и $l=e$ (б)

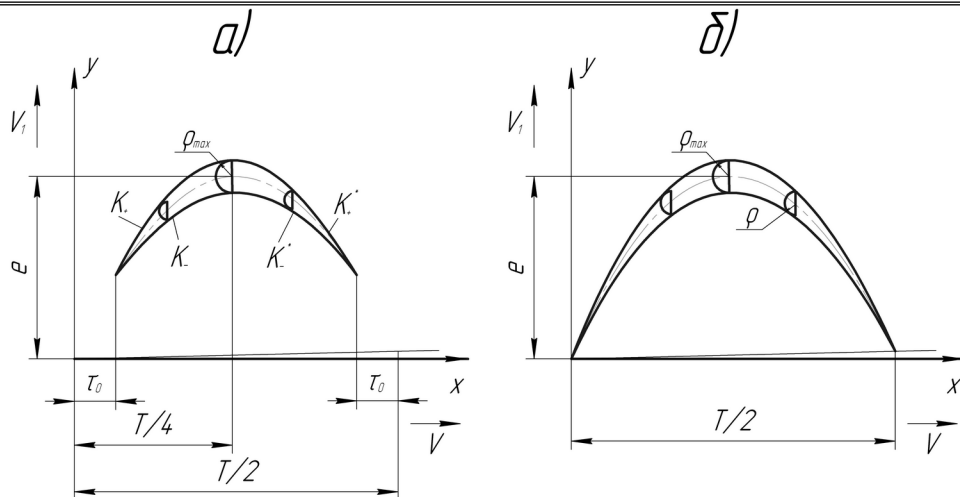


Рис. 2. Форма микролунок на плоскости развертки цилиндра при $\tau_0 \neq 0$ (а) и $\tau_0 = 0$ (б)

Таким образом, выражение (4) связывает начальный момент времени соприкосновения инструмента и поверхности детали с конструктивными элементами устройства для ДВР.

Рассмотрение образующихся микролунок ведется на плоскости XOY развертки цилиндра детали (рис. 2), при этом движение подачи резца производится в положительном направлении оси OY .

При врезании резца, режущая часть которого представляется как полусфера с радиусом r , в цилиндрическую поверхность без ее вращения на глубину h , изменяющуюся за период осцилляции от нуля до h_{max} , образуется отпечаток, граница которого на плоскости развертки имеет вид кривой, близкой к полуокружности радиусом ρ , определяемым по формуле

$$\rho \approx \sqrt{2rh}. \quad (5)$$

Траектория L движения центра C отпечатка на плоскости развертки задается параметрическими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} x &= v\tau \\ y &= v_1\tau + e \sin \frac{2\pi}{T}\tau \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где V – окружная скорость заготовки; v_1 – скорость движения центра C вдоль образующей цилиндра при отсутствии осцилляции.

Границы вырезанных микролунок представляют собой огибающие семейства полуокружностей переменного радиуса ρ , являющихся границами отпечатков, центры которых задаются уравнениями (6).

В каждый момент времени τ величина радиуса ρ определяется выражением

$$\rho = \rho_{max} \sin \frac{2\pi}{T}(\tau - \tau_0), \quad (7)$$

где ρ_{max} – максимальное значение радиуса полуокружности отпечатка при $\tau = T/4$.

Формула для оценки площади поверхности микролунок получена ранее для частного случая, когда $\tau_0 = 0$ при $l = e$, а инструмент соприкасается с поверхностью детали в течение полупериода, и приведена в работе [3]. Используя приведенную там методику определения площади поверхности микролунок, проведем эти расчеты для общего случая, когда $\tau_0 \neq 0$ при $l > e$.

Однопараметрическое уравнение семейства полуокружностей в каждый момент времени τ имеет вид:

$$y = v_1 \tau + e \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \tau \pm \sqrt{\rho_{\max}^2 \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{T} (\tau - \tau_0) - (v\tau - x)^2}, \quad (8)$$

где (+) – в границах от τ_0 до $T/4$; (–) – в границах от $T/4$ до $(T/2 - \tau_0)$.

Для определения огибающей этого семейства полуокружностей дифференцируем по τ обе части уравнения (8):

$$v_1 + \frac{2\pi e}{T} \cdot \cos \frac{2\pi}{T} \tau \pm \frac{\frac{2\pi}{T} \rho_{\max}^2 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} (\tau - \tau_0) \cdot \cos \frac{2\pi}{T} (\tau - \tau_0) - (v\tau - x)v}{\sqrt{\rho_{\max}^2 \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{T} (\tau - \tau_0) - (v\tau - x)^2}} = 0, \quad (9)$$

и, обозначив через

$$\psi(\tau) = \frac{1}{v} \left(v_1 + \frac{2\pi e}{T} \cos \frac{2\pi}{T} \tau \right), \quad (10)$$

получим

$$(v\tau - x)^2 (1 + \psi^2(\tau)) - \frac{2\pi \rho_{\max}^2}{Tv} (v\tau - x) \cdot \sin \frac{4\pi}{T} (\tau - \tau_0) + \left(\frac{\pi \rho_{\max}^2}{Tv} \right)^2 \cdot \sin^2 \frac{4\pi}{T} (\tau - \tau_0) - \psi^2(\tau) \cdot \rho_{\max}^2 \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{T} (\tau - \tau_0) = 0. \quad (11)$$

При $k = \frac{2\pi e}{Tv}$ с учетом того, что $\frac{v_1}{v} \approx 0$ и $\frac{\rho_{\max}^2}{Tv} = \frac{\rho_{\max}^2}{4e} \approx 0$, уравнение (11) примет

вид

$$x = v\tau - \frac{k\rho_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} \tau \cdot \sin \frac{2\pi}{T} (\tau - \tau_0)}{\sqrt{1 + k^2 \cos^2 \frac{2\pi}{T} \tau}}. \quad (12)$$

Подставляя выражение (12) в формулу (8), получим уравнения кривых K_+ в пределах границ от τ_0 до $T/4$ и K_- в пределах границ от $T/4$ до $(T/2 - \tau_0)$ (рис. 2):

$$x = v\tau - \frac{k\rho_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} \tau \cdot \sin \frac{2\pi}{T} (\tau - \tau_0)}{\sqrt{1 + k^2 \cos^2 \frac{2\pi}{T} \tau}}; \quad (13)$$

$$y = v_1 \tau + e \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \tau \pm \sqrt{\rho_{\max}^2 \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{T} (\tau - \tau_0) - \frac{k^2 \rho_{\max}^2 \cdot \cos^2 \frac{2\pi}{T} \tau \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{T} (\tau - \tau_0)}{1 + k^2 \cos^2 \frac{2\pi}{T} \tau}}, \quad (14)$$

или, произведя упрощения

$$\left. \begin{aligned} x &= v\tau - \frac{k\rho_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} \tau \cdot \sin \frac{2\pi}{T} (\tau - \tau_0)}{\sqrt{1 + k^2 \cos^2 \frac{2\pi}{T} \tau}} \\ y &= v_1 \tau + e \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \tau \pm \frac{\rho_{\max} \cdot \sin \frac{2\pi}{T} (\tau - \tau_0)}{\sqrt{1 + k^2 \cos^2 \frac{2\pi}{T} \tau}} \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Уравнения кривых K_- в пределах границ от τ_0 до $T/4$ и K_+^* в пределах границ от $T/4$ до $(T/2 - \tau_0)$ имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} x &= v\tau \\ y &= v_1\tau + (e \mp \rho_{\max}) \sin \frac{2\pi}{T}\tau \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

где $(-)$ – для кривой K_- ; $(+)$ – для кривой K_+^* .

Используя формулу для вычисления площади криволинейной трапеции в случае кривой, заданной параметрически $Q = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} y(\tau) \cdot x'(\tau) d\tau$ определим площадь микролунки за период осцилляции инструмента, как:

$$f = Q_{K_+} - Q_{K_-} + Q_{K_+}^* - Q_{K_-}^*, \quad (17)$$

где Q_{K_+} и $Q_{K_+}^*$ – площади криволинейных трапеций, заключенных между осью OX и кривыми K_+ и K_+^* в пределах от τ_0 до $(T/2 - \tau_0)$; Q_{K_-} и $Q_{K_-}^*$ – площади криволинейных трапеций, заключенных между осью OX и кривыми K_- и K_-^* в пределах от τ_0 до $(T/2 - \tau_0)$.

При этом,

$$Q_{K_+} = \int_{\tau_0}^{\frac{T}{4}} \left[\left(v_1\tau + e \cdot \sin \frac{2\pi}{T}\tau + \frac{\rho_{\max} \cdot \sin \frac{2\pi}{T}(\tau - \tau_0)}{\sqrt{1 + k^2 \cos^2 \frac{2\pi}{T}\tau}} \right) \times \left(v - \frac{2\pi k \rho_{\max}}{T} \times \frac{\left(1 + k^2 \cos^2 \frac{2\pi}{T}\tau \right) \cdot \cos \frac{2\pi}{T}(2\tau - \tau_0) + k^2 \sin \frac{2\pi}{T}\tau \cdot \cos^2 \frac{2\pi}{T}\tau \cdot \sin \frac{2\pi}{T}(\tau - \tau_0)}{\left(1 + k^2 \cos^2 \frac{2\pi}{T}\tau \right)^{3/2}} \right) \right] d\tau \quad (18)$$

$$Q_{K_+}^* = \int_{\frac{T}{4}}^{\frac{T}{2} - \tau_0} \left[\left(v_1\tau + e \cdot \sin \frac{2\pi}{T}\tau - \frac{\rho_{\max} \cdot \sin \frac{2\pi}{T}(\tau - \tau_0)}{\sqrt{1 + k^2 \cos^2 \frac{2\pi}{T}\tau}} \right) \times \left(v - \frac{2\pi k \rho_{\max}}{T} \times \frac{\left(1 + k^2 \cos^2 \frac{2\pi}{T}\tau \right) \cdot \cos \frac{2\pi}{T}(2\tau - \tau_0) + k^2 \sin \frac{2\pi}{T}\tau \cdot \cos^2 \frac{2\pi}{T}\tau \cdot \sin \frac{2\pi}{T}(\tau - \tau_0)}{\left(1 + k^2 \cos^2 \frac{2\pi}{T}\tau \right)^{3/2}} \right) \right] d\tau \quad (19)$$

$$Q_{K_-} = v \int_{\tau_0}^{\frac{T}{4}} \left[v_1\tau + (e - \rho_{\max}) \sin \frac{2\pi}{T}\tau \right] d\tau \quad (20)$$

$$Q_{K_-}^* = v \int_{\frac{T}{4}}^{\frac{T}{2} - \tau_0} \left[v_1\tau + (e + \rho_{\max}) \sin \frac{2\pi}{T}\tau \right] d\tau \quad (21)$$

Решение полученных интегралов позволяет определить площадь микролунки за период осцилляции инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю.Г. Шнейдер. Л.: Машиностроение, 1972. 240 с.

2. Патент РФ № 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. Определение опорной поверхности при дискретном вибрационном резании / Б.С. Орлов, А.А. Скрипкин, Н.В. Ермольчева // Авиационная промышленность. 2009. №3. С. 28-30.

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

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

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

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

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

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

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

Rodionov Igor Vladimirovich – doctor of technical sciences, professor of «Technology of mechanical engineering» Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 629.113.004.67

А.С. Денисов, Б.Ф. Тугушев, Е.Ю. Горшенина

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ ВТОРОГО РОДА В КОЛЕНЧАТОМ ВАЛЕ, ВОССТАНОВЛЕННОМ НАПЛАВОЧНЫМИ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЯМИ

Проведена оценка остаточных напряжений 2-го рода различных металлопокрытий. Представлены математические зависимости и сделаны соответствующие выводы.

Коленчатый вал, наплавка, остаточные напряжения 2-го рода

A.S. Denisov, B.F. Tugushev, E.Y. Gorshenina

STRESS ANALYSIS OF THE SECOND KIND IN THE CRANKSHFT, THE RESTORATION OF SURFACING METAL COATING

The estimation of residual stress of the 2nd kind of different metal coatings. The mathematical dependence and draw appropriate conclusions.

Crankshaft, welding-up, residual stresses of the 2nd kind

Предельные износы 85% деталей не превышают 0,3 мм, причем многие из них имеют остаточные ресурсы 60% и более и только 20% деталей автомобилей и тракторов, поступающих в ремонт, подлежат окончательной выбраковке. Остальные можно восстановить, причем себестоимость восстановления составит 15...70% от себестоимости изготовления [1].

В связи с этим, повышение технологического обеспечения качества восстановления коленчатого вала на основе комплексного изучения базовой операции металлопокрытия, служащей для формирования вторичной заготовки восстанавливаемой детали, и дальнейшей механической обработки явилось актуальной задачей.

На практике чаще всего применяются восстановительные технологии, основанные на электродуговой наплавке под слоем флюса. Технологическая операция нанесения металлопокрытий на поверхности коленчатых валов дизельных двигателей проводилась на станке с наплавочной головкой А-580М и источником питания дуги ВДУ-506.

Объект исследования - коленчатый вал двигателя КамАЗ-740, материал - сталь 42ХМФА ТУ 14-1-1296-75, имеющий следующий химический состав: углерод – 0,40...0,45%; кремний – 0,27...0,37%; марганец – 0,5...0,8%; ванадий – 0,08...0,12%; хром – 1,0...1,8%; молибден – 0,35...0,45%; сера – 0,01...0,035%; фосфор – 0,025%; медь – 0,35%; никель – 0,3%; остальное – железо, восстановленный методом наплавки под флюсом АН-348А ГОСТ 9087-81 следующего химического состава: SiO_2 - 41...44%; MnO - 34...38%; CaO < 6,5%, MgO - 5 – 7,5%, Al_2O_3 < 4,5%, CaF_2 - 4 – 5%, Fe_2O_3 ≤ 2,1%, S ≤ 0,15%, P ≤ 0,12%.

Для нанесения металлопокрытий применяли наплавочные материалы в виде проволок сплошного сечения: Св-08Г2С, Св-08Х20Н9Г7Т, Св-15ГСТЮЦА (ГОСТ 2246-70), Нп-30ХГСА (ГОСТ 10543-98).

Покрытия наносили на образцы, которыми служили коренные и шатунные шейки коленчатых валов дизельных двигателей марки КамАЗ-740.

Расчет микронапряжений покрытия, переходной зоны и зоны термического влияния осуществлялся методом гармонического анализа формы дифракционных линий [2]. Для расчета также были использованы дифрактограммы эталонов, микронапряжения в которых сводились к минимуму путем отжига аналогичных образцов при температуре 800°C в течение 1 часа.

Дифрактограммы исследуемых зон образцов с наплавленными металлопокрытиями и их эталонов были получены на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 с фокусировкой по методу Брэгга-Брентано [3]. Регистрация проводилась при непрерывном вращении образца и счетчика. При съемке использовался селективно-поглощающий Ni-фильтр. Для снятия внутренних напряжений поверхности шлифа, образцы были подвергнуты химическому травлению на глубину 0,1 мм.

Регистрировались распределения интенсивности отражения от кристаллографических плоскостей с интерференционными индексами 110 и 220. Режим съемки: напряжение на аноде - 26 кВ, сила тока – 10 мА. Дифрактограммы записывались на самописце. Скорость движения ленты составляла $0,2 \cdot 10^{-3}$ м/с. Угловая скорость вращения детектора при регистрации линий первого порядка – 1/1 град/мин, при регистрации линий второго порядка – 1/8 град/мин. Промер рентгенограмм производился масштабной линейкой с погрешностью $\pm 0,5$ мм.

Известно [4], что характер распределения интенсивности отражения на дифрактограмме обусловлен как физическими факторами, так и условиями съемки, то есть геометрическими факторами. Физическими факторами в данном случае являются внутренние напряжения 2-го рода (микронапряжения) и величина областей когерентного рассеивания (блоков дисперсности).

Для выделения искомого распределения интенсивности, зависящего от физических факторов $f(x)$, из экспериментального распределения $h(x)$ исключалось распределение интенсивности, обусловленное геометрическими факторами $g(x)$. Распределение интенсивности $g(x)$ получали в результате исследования эталона, роль физических факторов в котором незначительна. Для нахождения $f(x)$ следовало разложить в ряды Фурье кривые $h(x)$ и $g(x)$. Пределы интегрирования определялись от точки на оси с двойным углом Вульфа-Брэгга 2θ , соответствующей максимуму интерференционной кривой до точки, где кривые $h(x)$ и $g(x)$ сливались с фоном.

При анализе отражений выбор интервала разложения осуществлялся в соответствии со следующим правилом: если интервал разложения для линии первого порядка соответствовал $\Delta 2\theta_{h1k1l1}$, то для линии второго порядка он соответствовал $\Delta 2\theta_{h2k2l2}$, что определялось по формуле:

$$\Delta 2\theta_{h2k2l2} = \Delta 2\theta_{h1k1l1} \cdot \frac{\cos \theta_{h1k1l1}}{\cos \theta_{h2k2l2}} \quad (1)$$

Коэффициенты Фурье для каждой из этих интерференционных линий определялись по формулам:

$$a_{oh} = \frac{2}{2N+1} \cdot \sum_{i=-N}^N h_i \quad ; \quad (2)$$

$$a_{og} = \frac{2}{2N+1} \cdot \sum_{i=-N}^N g_i \quad ; \quad (3)$$

$$a_{kh} = \frac{2}{2N+1} \cdot \sum_{i=-N}^N h_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi k}{2N+1} \cdot i\right) \quad ; \quad (4)$$

$$a_{kg} = \frac{2}{2N+1} \cdot \sum_{i=-N}^N g_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi k}{2N+1} \cdot i\right) \quad ; \quad (5)$$

$$b_{kh} = \frac{2}{2N+1} \cdot \sum_{i=-N}^N h_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi k}{2N+1} \cdot i\right) \quad ; \quad (6)$$

$$b_{kg} = \frac{2}{2N+1} \cdot \sum_{i=-N}^N g_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi k}{2N+1} \cdot i\right) \quad , \quad (7)$$

где a_{oh}, \dots, b_{kg} – коэффициенты Фурье соответствующих кривых; N – половина числа отрезков разбиения; h_i, g_i – ординаты соответствующих кривых, вычисленные по формулам:

$$h_i = \frac{h_i'}{h_{i\max}'} \cdot 100 \quad , \quad (8)$$

$$g_i = \frac{g_i'}{g_{i\max}'} \cdot 100 \quad , \quad (9)$$

где h_i', g_i' – ординаты соответствующих кривых на дифрактограммах; $h_{i\max}', g_{i\max}'$ – максимальное значение соответствующих ординат; k – номер гармоники разложения; i – номер точки на оси 2θ .

Коэффициенты кривой истинного уширения $f(x)$ связаны с коэффициентами Фурье кривых $h(x)$ и $g(x)$ зависимостями:

$$a_{of} = \frac{1}{2N+1} \cdot \frac{a_{oh} \cdot a_{og} + b_{oh} \cdot b_{og}}{a_{og}^2 + b_{og}^2} \quad ; \quad (10)$$

$$a_{kf} = \frac{1}{2N+1} \cdot \frac{a_{kh} \cdot a_{kg} + b_{kh} \cdot b_{kg}}{a_{kg}^2 + b_{kg}^2} \quad ; \quad (11)$$

$$b_{kf} = \frac{1}{2N+1} \cdot \frac{b_{kh} \cdot a_{kg} - a_{kh} \cdot b_{kg}}{a_{kg}^2 + b_{kg}^2} \quad . \quad (12)$$

Количество гармоник брали не более 6...7. Затем выполнялись вычисления по формуле:

$$P_k = \sqrt{a_{kf}^2 + b_{kf}^2} \quad , \quad (13)$$

Для дальнейших расчетов полученные значения необходимо было нормировать на один, то есть выполнялись преобразования по формулам:

$$a_{oh} = 1 \quad ; \quad (14)$$

$$a_{kh} = \frac{a_{kf}}{a_{of}} \quad ; \quad (15)$$

$$b_{kh} = \frac{b_{kf}}{b_{of}} \quad . \quad (16)$$

Номер коэффициента Фурье n связан с расстоянием в кристаллической решетке l_n следующим выражением:

$$l_n = \frac{2tg\theta}{\Delta(2\theta)_{h2k2l2}} \cdot d_{hkl} \cdot n \quad , \quad (17)$$

где θ – угол Вульфа-Брэгга, соответствующий дифракционной линии; d_{hkl} – межплоскостное расстояние, определяемое по формуле:

$$d_{hkl} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad , \quad (18)$$

где λ – длина волны излучения, определяемая, в свою очередь, по формуле:

$$\lambda = \frac{2\lambda_{\alpha 1} + \lambda_{\alpha 2}}{3} \quad . \quad (19)$$

где $\lambda_{\alpha 1}$ – длина волны α_1 – составляющей рентгеновского спектра; $\lambda_{\alpha 2}$ – длина волны α_2 – составляющей рентгеновского спектра.

Существует зависимость [2]:

$$P_k = A_k^{\hat{\alpha}l} \cdot A_k^{mn} \quad , \quad (20)$$

где $A_k^{\hat{\alpha}l}$ – коэффициент, зависящий от размера областей когерентного рассеивания; A_k^{mn} – коэффициент, зависящий от величины микроискажений решетки.

Коэффициент $A_k^{\hat{\alpha}l}$ не зависит от величины $(H^2+K^2+L^2)$, где H, K, L – индексы Миллера отражающей плоскости. Поэтому, если получить значения $\ln(P_k)$ для нескольких линий дифрактограмм, то можно найти $\ln(A_k^{\hat{\alpha}l})$ и $\ln(A_k^{mn})$, построив график в координатах $(\ln(P_k), (H^2+K^2+L^2))$ для разных k .

Величину $\ln(A_k^{\hat{\alpha}l})$ находили по отрезку, отсекаемому на оси ординат. Затем определяли $\ln(A_k^{mn})$:

$$\ln(A_k^{mn}) = \ln(P_k) - \ln(A_k^{\hat{\alpha}l}) \quad . \quad (21)$$

Величину среднеквадратической деформации Δl_n определяли по формуле:

$$\Delta l_n = \frac{d_{hkl}}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \sqrt{-\ln A_k^{mn}} \quad . \quad (22)$$

Относительные микродеформации ε_n определяли по уравнению:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta l_n}{l_n} \quad . \quad (23)$$

Размер областей когерентного рассеивания $D_{окр}$ определяли в соответствии с зависимостью:

$$D_{окр} = \frac{l_1}{A_1^{\hat{\alpha}l} - A_2^{\hat{\alpha}l}} \quad , \quad (24)$$

Алгоритм расчета был реализован в виде программы, составленной на языке BASIC применительно к персональному компьютеру [5].

Расчет периодов кристаллических решеток исследуемых образцов осуществлялся по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} * \sqrt{H^2 + K^2 + L^2} \quad , \quad (25)$$

где a – период кристаллической решетки; λ – длина волны рентгеновского излучения, вычисляемая по формуле (19); θ – угол скольжения рентгеновских лучей; H, K, L – индексы Миллера

Остаточные напряжения второго рода – это внутренние напряжения, возникающие в кристаллитах металла [2]. Распределение остаточных напряжений второго рода представлены на рис.1-4.

Из этого следует: при наплавке Св-08Г2С в зоне сплавления наблюдается высокий градиент изменения относительных микродеформаций, что говорит о наличии дефектов кристаллической структуры металла.

При наплавке Нп-30ХГСА изменение внутренних напряжений 2-го рода носит плавный характер, присущий как зоне наплавки, так и другим характерным зонам металла.

Напряжения в образцах, наплавленных Св-08Х20Н9Г7Т имеют периодически плавно изменяющийся характер, что свидетельствует о наличии незначительных дефектов в структуре металла.

При наплавке Св-15ГСТЮЦА также как и в случае с Св-08Г2С наблюдается высокий градиент изменения напряжений.

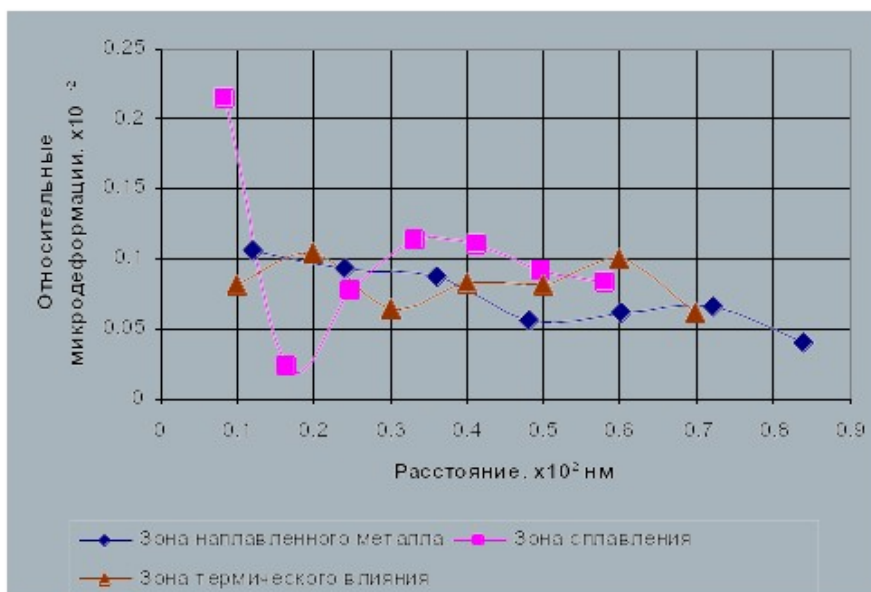


Рис.1. Распределение остаточных напряжений второго рода в образцах, наплавленных 08Г2С

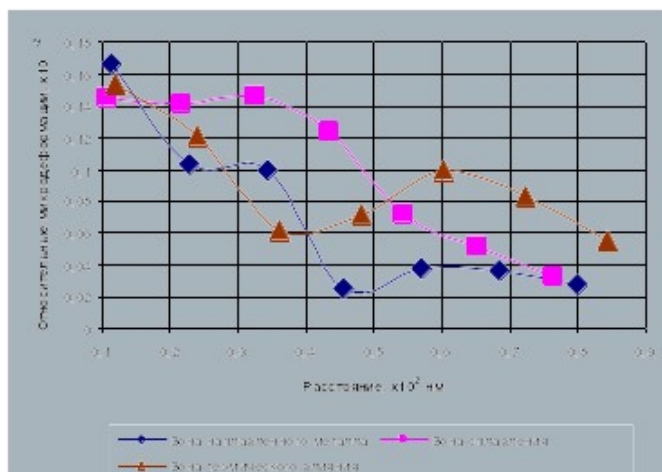


Рис.2. Распределение остаточных напряжений второго рода в образцах, наплавленных Нп-30ХГСА

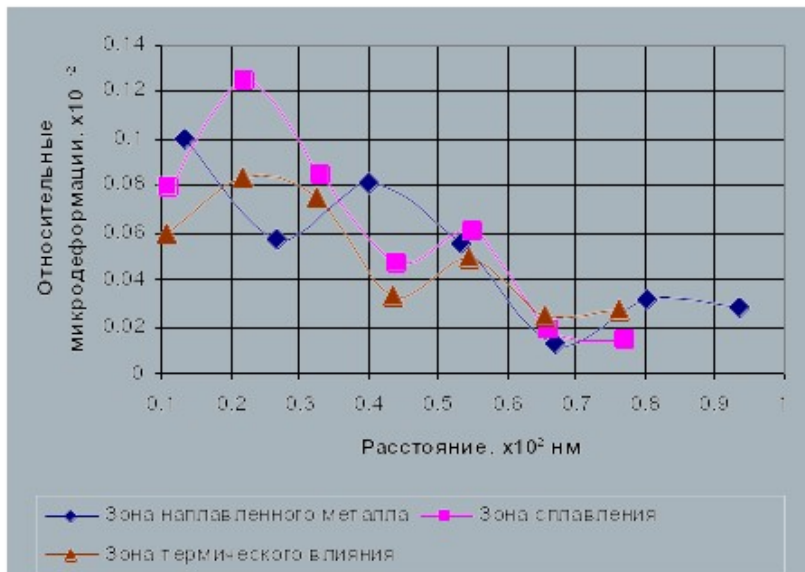


Рис.3. Распределение остаточных напряжений второго рода в образцах, наплавленных Св-08Х20Н9Г7Т

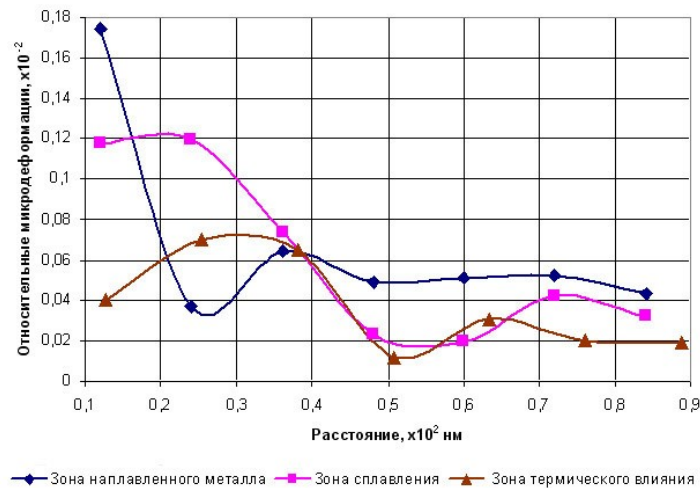


Рис.4. Распределение остаточных напряжений второго рода в образцах, наплавленных проволокой Св-15ГСТЮЦА

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что наиболее благоприятными свойствами, с точки зрения сопротивления развитию трещин, обладают металлопокрытия, наплавленные Св-08Х20Н9Г7Т и Нп-30ХГСА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ эксплуатационных дефектов коленчатого вала двигателя КамАЗ-740 / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, Б.Ф. Тугушев, Е.Ю. Горшенина, А.А. Видинеев // Ремонт, восстановление, модернизация. 2010, № 6. С. 30-38.
2. Горелик С.С. Рентгенографический и электроннооптический анализ / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. М.: Металлургия, 1970. 366 с.
3. Русаков А.А. Рентгенография металлов / А.А. Русаков. М.: Атомиздат, 1977. 480 с.
4. Васильев Д.М. Дифракционные методы исследования структур / Д.М. Васильев. М.: Металлургия, 1977. 248 с.
5. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ: Справочник / В.П. Дьяконов. М.: Наука, 1989. 240 с.

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

Denisov Alexander Sergeevitch – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Automobiles and automotive enterprise» of the Saratov State Technical University

Тугушев Борис Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета

Tugushev Boris Fedorovitch – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Automobiles and automotive enterprise» of the Saratov State Technical University

Горшенина Екатерина Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета

Gorshenina Ekaterina Yurievna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Automobiles and automotive enterprise» of the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.357.7.014

А.С. Денисов, А.Р. Асоян, В.М. Юдин

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ШАТУННЫХ ПОДШИПНИКОВ ДВИГАТЕЛЯ КАМАЗ, ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА ШАТУНОВ

Проведен анализ причин отказов автотракторных двигателей в эксплуатации, дана характеристика дефектов шатунов при капитальном ремонте, разработана схема технологического процесса восстановления шатунов, дана их технико-экономическая оценка.

Автотракторные двигатели, дефекты двигателей, восстановление шатунов

A.S. Denisov, A.R. Asoyan, V.M. Yudin

INCREASED DURABILITY ROD BEARING ENGINE KAMAZ, BY IMPROVING THE TECHNOLOGY OF REPAIR ROD

The causes of failure of automotive engines in operation, the characteristic defect rods at major repairs, a scheme for process recovery rods, given their technical and economic evaluation.

Automotive engines, engine damage, recovery of rods

Наиболее полное использование ресурса двигателя возможно при правильной эксплуатации автомобиля и качественном ремонте. Качество капитального ремонта (КР) и его технология во многом определяется дефектами основных элементов двигателя.

Данные по дефектам двигателей, снятым в капитальный ремонт, содержатся в статистике эксплуатирующих организаций. В табл. 1. приведено распределение пробега двигателей КамАЗ-740 до КР по основным дефектам по данным Московского филиала «КамАЗ автоцентр». Результаты обработки приведены в табл. 1 и рис. 1.

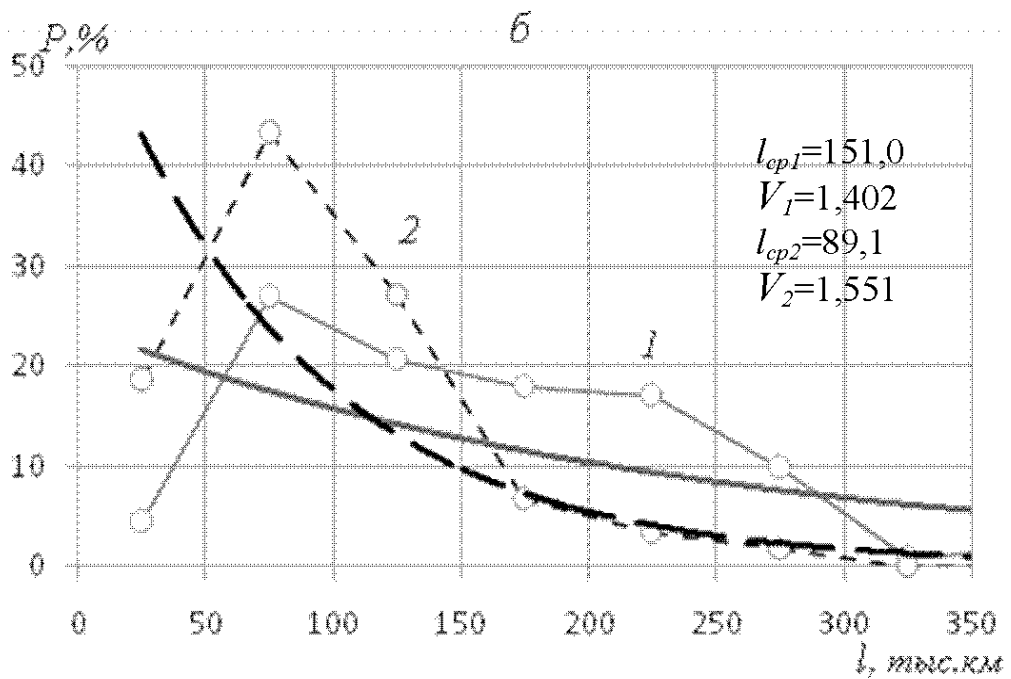
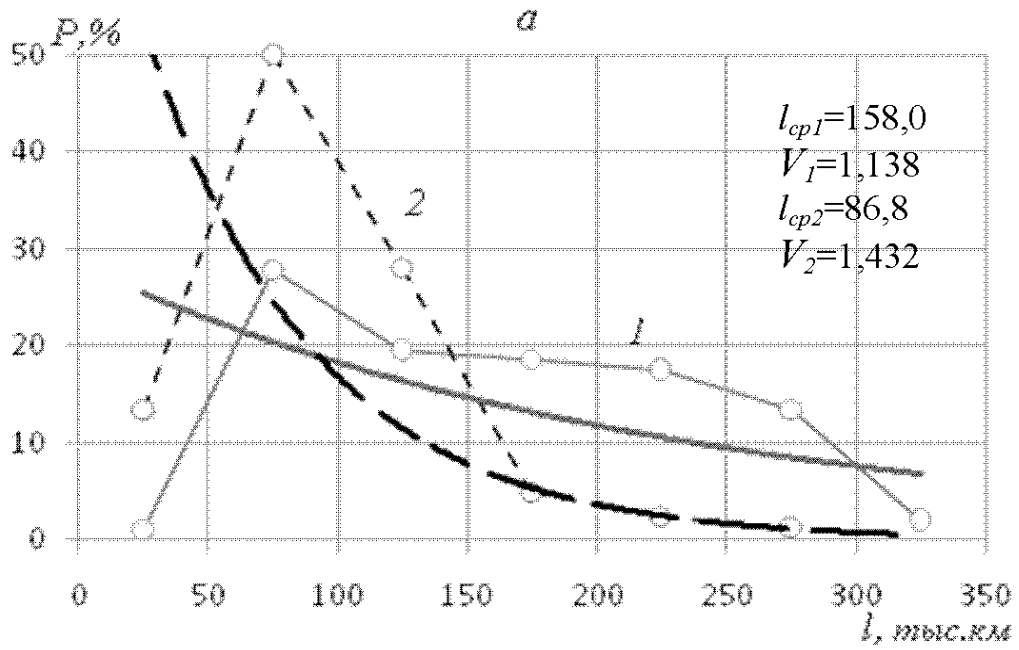
Из табл. 1, 2 следует, что по причине естественного износа деталей в до ремонтный период поступает в КР 44,36% двигателей, а в межремонтный только 31,51%. Коэффициент вариации наработки до КР по этой группе дефектов минимальный и закон распределения наработки до КР здесь близок к нормальному.

По основным дефектам аварийного характера (4,5,6,7) доля двигателей в межремонтный период в 1,62 раза выше, чем в до ремонтный. В целом по всей совокупности двигателей из-за большой доли аварийных отказов наблюдается значительная вариация наработки до КР ($V > 1$), что соответствует экспоненциальному закону распределения, характерному для отказов аварийного характера из-за нарушения правил эксплуатации и конструктивно-технологических недоработок. Особенно это относится к дефектам, связанным с шатуном: проворачивание вкладышей, обрыв шатуна и шатунных болтов (дефекты 4 и 5 из табл.1) .

Распределение пробега двигателей КамАЗ-740 в до ремонтном (Н) и межремонтном (Р) периодах эксплуатации по основным дефектам по данным Московского филиала «КамАЗавтоцентр», %

Наименование дефектов	Пер иод	Интервалы пробега, тыс.км										Двигатели с дефектами	
												Всего	НРТА
		0-30	30-100	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	св 350				
1.Естественный износ ЦПГ и КШМ	Н	-	0,92	0,61	14,24	21,05	20,74	36,22	6,19	44,36	-		
	Р	0,78	17,32	15,74	22,04	13,38	30,70	-	-	31,51	-		
2. Пылевой (абразивный) износ ЦПГ и КШМ	Н	-	18,94	14,73	34,73	28,42	3,15	-	-	13,04	0,27		
	Р	1,92	51,92	26,92	11,53	5,76	1,92	-	-	12,90	-		
3. Износ ЦПГ вследствие перегрева двигателя	Н	-	33,34	22,22	22,22	22,22	-	-	-	1,23	-		
	Р	10,00	40,00	20,00	20,00	10,00	-	-	-	2,48	-		
4. Проворачивание коренных и шатунных вкладышей	Н	1,03	27,83	19,58	18,55	17,52	13,40	2,06	-	13,32	5,08		
	Р	13,41	50,00	28,04	4,87	2,43	1,21	-	-	20,34	9,42		
5. Обрыв шатуна, шатунных болтов, поршня	Н	4,50	27,02	20,72	18,01	17,11	9,90	0,90	1,80	15,24	9,06		
	Р	18,64	43,37	27,11	6,77	3,38	1,69	-	-	14,64	7,94		
6. Поломка коленчатого вала	Н	-	28,57	14,28	28,57	14,28	14,28	-	-	0,96	0,41		
	Р	9,09	54,54	27,27	9,09	-	-	-	-	2,72	0,99		
7. Трещина блока цилиндров	Н	-	18,57	14,28	17,14	20,00	20,00	7,14	2,85	9,61	0,54		
	Р	13,04	43,47	23,91	8,69	4,34	4,34	2,17	-	11,41	0,24		
8. Дефекты масляного насоса	Н	-	-	50,00	25,00	25,00	-	-	-	0,54	-		
	Р	33,33	33,33	33,34	-	-	-	-	-	0,74	-		
9. Прочие	Н	8,33	25,00	25,00	25,00	8,33	8,34	-	-	1,64	-		
	Р	23,07	38,46	15,38	7,69	7,69	7,69	-	-	3,22	-		
Итого	Н	0,96	13,59	10,43	18,81	20,60	15,10	17,17	3,29	100,00	15,38		
	Р	8,93	37,46	22,82	12,40	6,94	11,16	0,24	-	100,00	18,61		

НРТА – нарушение регулировки топливной аппаратуры



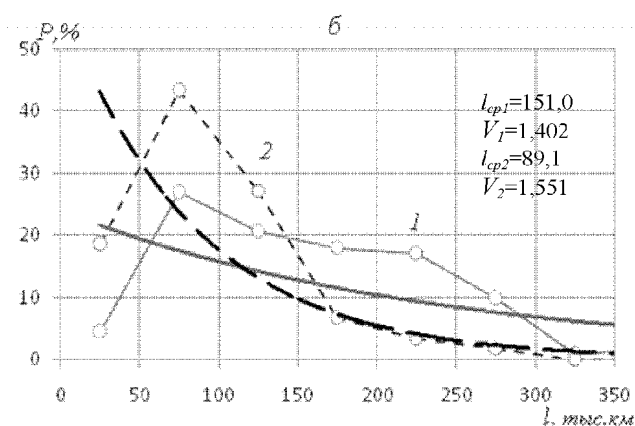
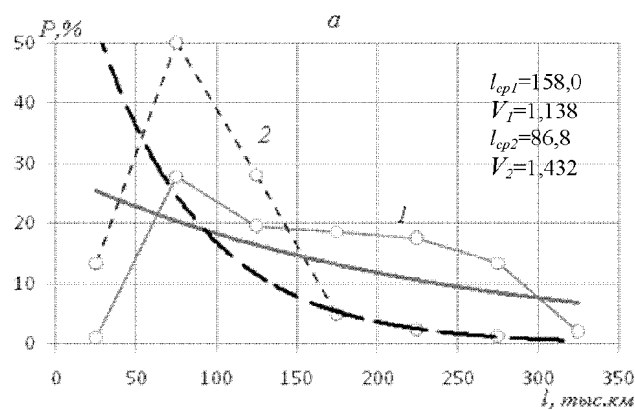


Рис. 1. Распределение наработки двигателя КамАЗ-740 до капитального ремонта по причинам: а – проворачивания коренных и шатунных вкладышей; б – обрыва шатуна, шатунных болтов: 1 – в до ремонтном периоде, 2 – в межремонтном периоде

Таблица 2
 Параметры распределения наработки до первого КР (Н)
 и между КР (Р) двигателями КамАЗ-740

Наименование дефектов	Период	Параметры			Доля двигателей с расплывшимися ТНВД
		Среднее значение, тыс. км	Средне-квадратическое отклонение, тыс. км	Коэффициент вариации	
1. Естественный износ ЦПГ и КШМ	Н	271,3	149,9	0,552	-
	Р	184,1	157,7	0,857	-
2. Пылесвой (абразивный) износ ЦПГ и КШМ	Н	163,6	116,9	0,714	2,07
	Р	106,1	127,3	1,200	-
3. Износ ЦПГ вследствие перегрева двигателя	Н	138,3	106,7	0,772	-
	Р	110,0	130,6	1,188	-
4. Проворачивание коренных и шатунных вкладышей	Н	158,0	179,7	1,138	38,13
	Р	86,8	123,5	1,423	46,31
5. Обрыв шатуна, шатунных болтов, поршня	Н	151,0	211,7	1,402	59,44
	Р	89,1	138,2	1,551	54,23
6. Поломка коленчатого вала	Н	158,0	140,9	0,892	45,05
	Р	86,8	84,3	0,971	36,39
7. Трещина блоков цилиндров	Н	193,8	205,4	1,059	5,61
	Р	104,5	182,9	1,751	2,10
8. Дефекты масляного насоса	Н	162,5	64,0	0,394	-
	Р	68,3	65,0	0,958	-
9. Прочее	Н	134,0	160,6	1,198	-
	Р	99,7	176,5	1,769	-
10. Итого	Н	211,0	225,0	1,067	15,38
	Р	122,9	173,8	1,414	18,61

Из таблицы 3 следует, что наиболее низкий вторичный ресурс наблюдается по дефектам (4-8). Это обусловлено более низким давлением в системе смазки отремонтированных двигателей, большим накоплением усталостных повреждений (трещин) на коленчатых валах. Большая неоднородность составляющих при КР приводит к большой неоднородности качества ремонта и большому рассеиванию вторичного ресурса, о чем свидетельствует соотношение коэффициентов вариации, которое в 1,08-2,43 (в среднем в 1,32) раза выше, чем по не отремонтированным двигателям.

Таблица 3

Соотношение параметров долговечности двигателей КамАЗ-740
в межремонтном и до ремонтном периодах эксплуатации

Наименование дефектов	\bar{T}_p / \bar{T}_n	V_p / V_n
1. Естественный износ ЦПГ и КШМ	0,67	1,55
2. Пылевой (абразивный) износ ЦПГ и КШМ	0,64	1,68
3. Износ ЦПГ вследствие перегрева двигателя	0,79	1,53
4. Проворачивание коренных и шатунных вкладышей	0,54	1,25
5. Обрыв шатуна, шатунных болтов, поршня	0,58	1,10
6. Поломка коленчатого вала	0,55	1,08
7. Трещина блока цилиндров	0,53	1,65
8. Дефекты масляного насоса	0,42	2,43
9. Прочие	0,74	1,47
10. Итого	0,58	1,32

Примечание к табл. 1.4: \bar{T}_p и \bar{T}_n – средняя наработка до КР соответственно до повторного и до первого; V_p и V_n – соответствующие коэффициенты вариации.

Таким образом, проведенный анализ показывает: по причине естественного износа деталей в КР поступает 44,36% не отремонтированных и 31,51% отремонтированных двигателей, остальные поступают в ремонт, как правило, с аварийными повреждениями основных деталей; значительная часть аварийных двигателей (36-59%) эксплуатировались с нарушением правил эксплуатации (распломбирование ТНВД); по основным дефектам аварийного характера доля двигателей в межремонтный период в 1,62 раза выше, чем в до ремонтный; из-за большой доли аварийных двигателей наблюдается значительная вариация наработки до КР ($V > 1$); в среднем вторичный ресурс составляет 58% первичного, особенно низкий вторичный ресурс по двигателям с проворачиванием вкладышей, обрывом шатунов и шатунных болтов, поломкой коленчатого вала; рассеивание вторичного ресурса в среднем в 1,32 раза больше, чем первичного. Для повышения межремонтных пробегов двигателей необходимо повышать уровень их технической эксплуатации, совершенствовать технологию и качество ремонта.

Полученные данные по изменению технического состояния шатуна в процессе эксплуатации являются основой для обоснования содержания основных этапов технологического процесса его восстановления. Схема технологического процесса восстановления шатуна приведена на рис. 2.

Выбор возможного маршрута технологического процесса восстановления определяется дефектовочной операцией, которая проводится в соответствии с картой дефектации.

Технологический процесс твердого железнения предусматривает получение на деталях железных износостойких покрытий высокой твердости непосредственно из ванны без последующей упрочняющей обработки. Предложенный технологический процесс восстановления шатуна обеспечивает стабильность формы нижней головки шатуна после ремонта.

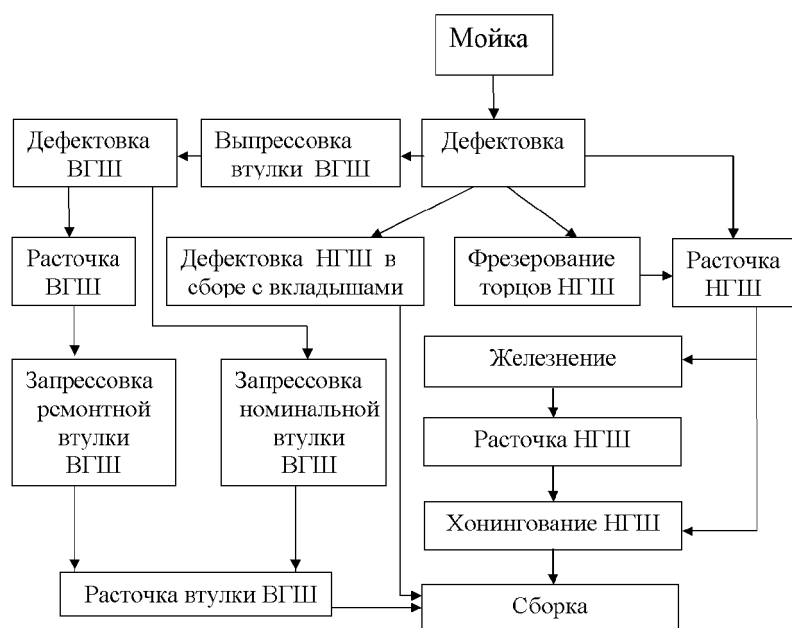


Рис. 2. Схема технологического процесса восстановления шатуна

Интенсивность изменения технического состояния шатунных подшипников в процессе эксплуатации после восстановления по предложенной технологии в среднем на 15% ниже, чем после замены вкладышей без ремонта шатунов и на 11% выше, чем у новых двигателей. Это позволяет повысить межремонтный ресурс в среднем на 15%, снизить долю подлежащих замене шатунов с 24,5% до 11,9% и получить годовой экономический эффект на один двигатель КамАЗ-740 в размере 1298 руб. По Саратовской области годовой экономический эффект составит 12980000 руб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов А.С. Восстановление шатунов автотракторных двигателей / А.С. Денисов, А.Р. Асоян, В.М. Юдин. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 250 с.
2. Восстановление деталей силового агрегата КамАЗ-740.11-240 (Euro-1) / Р.А. Азаматов, А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, П.Г. Курдин. Набережные Челны.: КамАЗ техобслуживание, 2007. 307 с.

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

Denisov Alexander Sergeyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor Head of sub-department «Cars and automobile economy», of Saratov State Technical University

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

Asoyan Arthur Rafikovich – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of «Cars and automobile economy» of Saratov State Technical University

Юдин Виктор Михайлович –

Yudin Victor Mikhaylovich –

кандидат технических наук, нач. каф.
автомобильного транспорта Вольского
филиала Санкт-Петербургского
военного университета тыла

manager dep. back Volsky's motor
transport of branch of the St. Petersburg
military man of university

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

А.А. Игнатьев, В.А. Каракозова

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ ПОДАЧИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА
ПО ЗАПАСУ УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЫБОРА
РЕЖИМА ОБРАБОТКИ И УЧЕТА В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА**

Предлагается методика определения допустимой подачи шлифовального круга по максимуму запаса устойчивости ДС для выбора рационального режима обработки и контролю динамических характеристик станков по уровню вибраций в условиях производства.

Шлифование, подача круга, передаточная функция, виброакустические колебания, критерий Михайлова, динамические характеристики, запас устойчивости, мониторинг

A.A. Ignatyev, V.A. Karakozova

**DEFINITION OF ADMISSIBLE GIVING OF THE GRINDING CIRCLE
ON THE STOCK OF STABILITY OF DYNAMIC SYSTEM
FOR THE CHOICE OF THE MODE OF PROCESSING
AND THE ACCOUNT IN MONITORING SYSTEM**

The technique of definition of admissible giving of a grinding circle to the maximum a stock of stability of DS for a choice of a rational mode of processing and to control of dynamic characteristics of machines on level of vibrations in conditions of production is offered.

Grinding, circle giving, transfer function, vibroacoustic fluctuations, Mikhaylov's criterion, dynamic characteristics, stability stock, monitoring

В условиях производства, в частности, в процессе шлифования деталей подшипников, возникает задача выбора рациональной совокупности контролируемых параметров на станке и организация процедуры контроля в системе мониторинга в соответствии с реально существующими ограничениями (по возможностям измерительных и вычислительных устройств, ограниченной точности измерений, по размещению датчиков на технологическом оборудовании, по временным и материальным ресурсам и т.п.) [1, 2, 3].

В результате обучающего эксперимента формируются эталонные (паспортные) динамические характеристики станков, которые в процессе эксплуатации используются для сравнительной оценки с текущими характеристиками, и в случае их разладки проводятся мероприятия по корректировке режима обработки – изменение подачи круга (рис.1) [4].

Мониторинг технологического процесса (ТП) базируется на периодическом контроле выбранного информационного параметра и сравнении его значения с пороговым, полученным на стадии обучающего эксперимента. Этот способ рекомендуется использовать для од-

нотипных станков и выявления тех из них, которые находятся в критическом состоянии. Для реального автоматизированного производства подшипников целесообразно использовать именно данный подход для оценки динамических характеристик станков в условиях эксплуатации, что позволяет осуществлять оперативный контроль оборудования и в известном смысле гарантирует выпуск высококачественных колец подшипников.

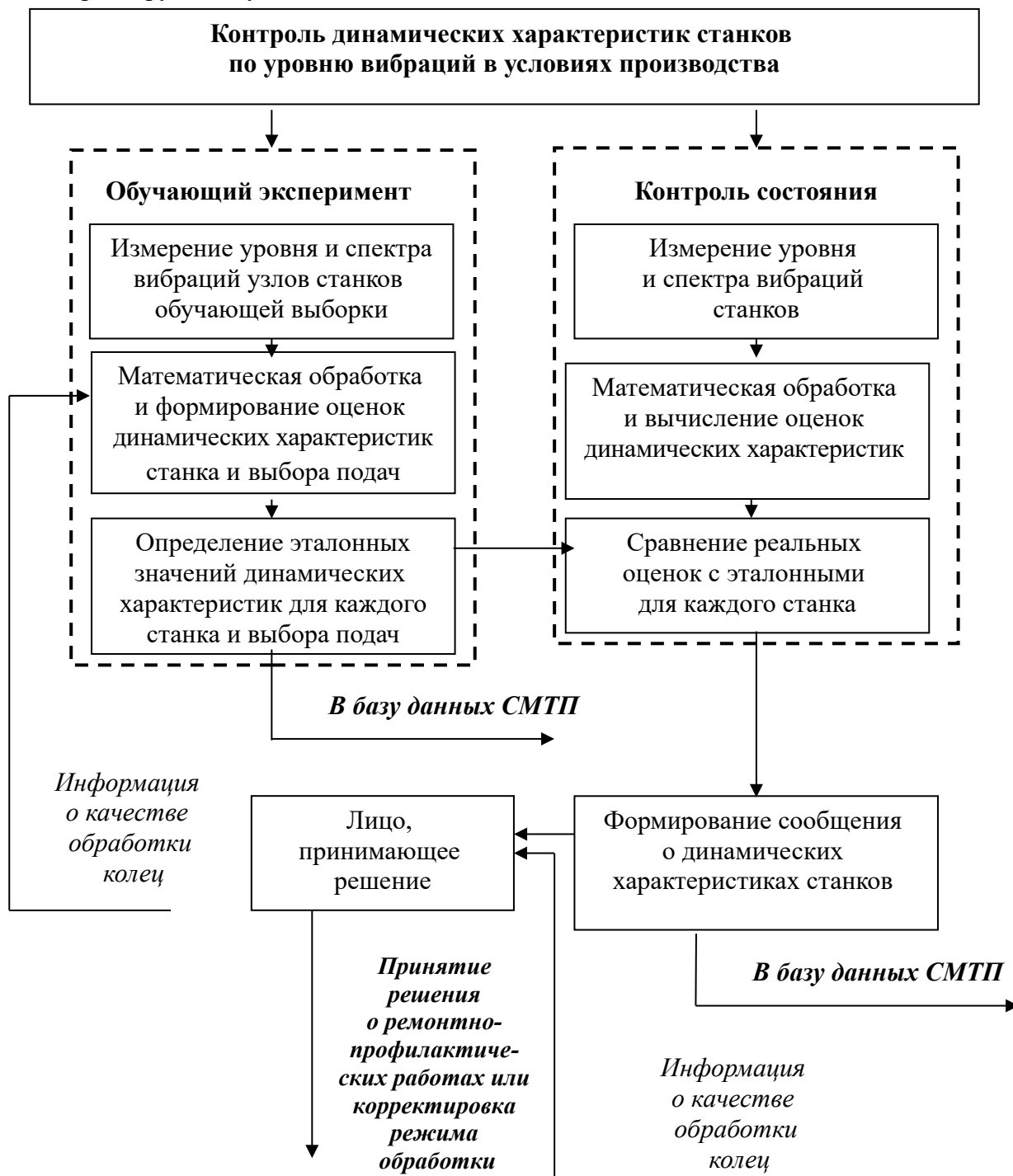


Рис. 1. Контроль динамических характеристик станков как элемент системы мониторинга

Оперативная оценка динамических характеристик станков реализуется созданием переносных испытательно-диагностических комплексов (ИДК), причем с их помощью оце-

ниваются частотные характеристики, например, динамические, непосредственно в условиях эксплуатации [5]. Существенным при этом является разработка показателей динамического качества, пригодных для автоматизированной оценки в ИДК. Наиболее объективными показателями качества являются динамические характеристики, полученные непосредственно в процессе обработки. Для этого необходима методика автоматизированных измерений, связанная к конкретной модели станка и заданной технологии обработки (рис.2.).

В качестве переносного ИДК выступает комплект аппаратуры, включающий виброизмеритель ВШВ-003М3, датчик которого устанавливается на основные узлы формообразующей подсистемы (широкий диапазон частот 400...4000 Гц) и Notebook. Шероховатость

Подналадка станка
 Корректировка режима обработки
 Улучшение качества заготовок
 Принятие решения об управлении качеством обработки колец

Полученные данные о ВА колебаний обрабатываются на компьютере в среде MatLab [6]. Обработка данных позволяет установить характер изменения спектра виброакустических (ВА) колебаний

Формирование оценки динамического состояния
 Выбор режима шлифования

Следует отметить, что в соответствии с теоретическими положениями В.А. Кудинова об устойчивости ДС это значение рассматривается как необходимый запас устойчивости технологической системы [1]. Достаточными показателями качества являются запас устойчивости ДС.

Ранее, в работах [7, 8]. было идентифицировано динамическое состояние шлифовального станка и получено ее автокорреляционной функции (АКФ) модели шлифовального станка модели SIW-5, обрабатывающего кольца подшипников. далее по максимальному запасу устойчивости при различных подачах определялась рациональная подача для каждого станка.

Измерение и обработка данных о динамическом состоянии станка
 Измерение и обработка данных о качестве заготовки и детали

Анализ параметров качества заготовок
 Контроль динамических характеристик
 Входной контроль
 Выходной контроль

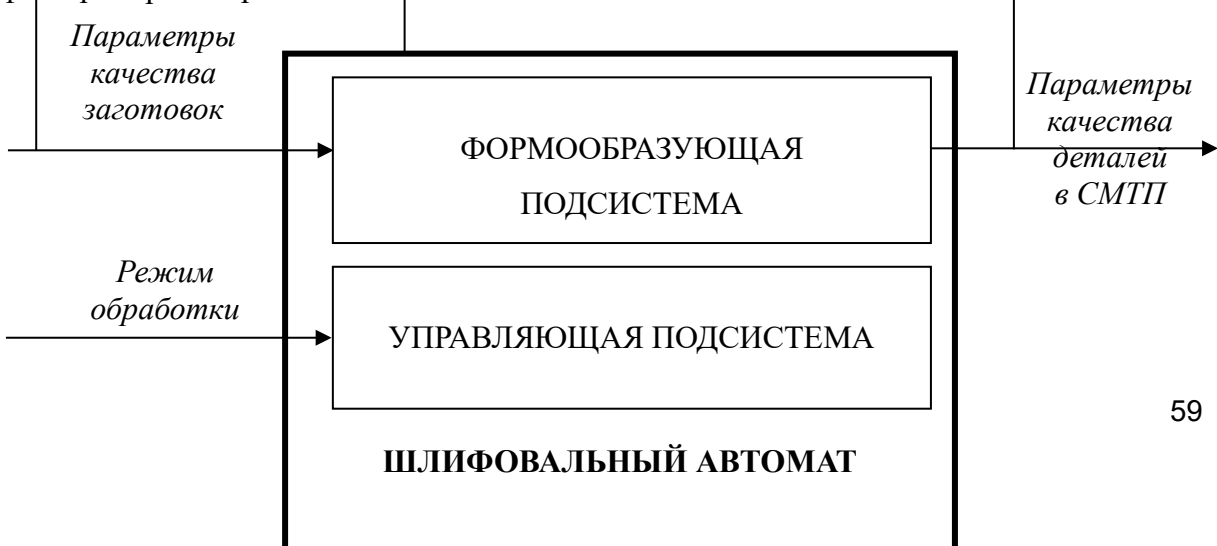




Рис.2. Методика выбора режима шлифования на основе оценки динамических характеристик и качества обработки поверхностей качения колец

Для экспериментов отбирались кольца с припуском 200+20-мк или 300+20мк. На каждой подаче с соответствующей скоростью съема припуска обработано по 3 кольца. Результаты измерений усреднялись. На приведенных ниже графиках (рис. 3 и рис. 4.) показано, как

отражается связь запаса устойчивости со скоростью съема припуска, которая вычислялась МПМАК для станка SIW-4. Критическая скорость съема припуска, как это было ранее показано, составляет 170 мкм/с, при которой возникают повышенные вибрации и существенно снижается запас устойчивости и качество поверхности, оцениваемое в баллах.

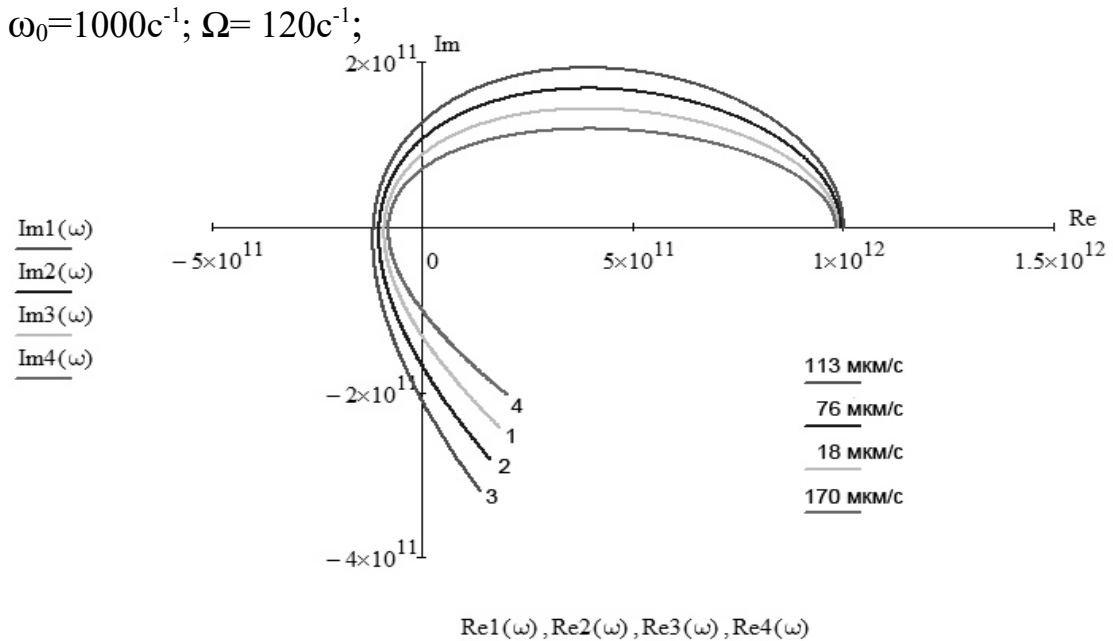


Рис.3. Годографы Михайлова динамической системы станка для различных подач круга



Рис.4. Связь скорости съема припуска с качеством обработки поверхности на шлифовальном станке SIW-4

Изложенное подтверждает достоверность связи запаса устойчивости ДС с подачей круга, выявленную ранее для станков SIW-5. Для практической реализации метода предлага-

ется использовать технические возможности МПМАК, управляющего работой станка и связанного с системой мониторинга технологического процесса (СМТП).

Таким образом, анализ передаточной функции ДС станка, что согласуется с результатами, полученными в работах [7,8] позволяет установить такую характеристику качества ДС как запас устойчивости, которую можно использовать для обоснования режима шлифования на станке, а также обеспечить стабильное качество поверхностного слоя (6-7 баллов) вместо (3-4 баллов) при ранее использованных режимах, и высокое качество обработки колец подшипников при выбранных параметрах, что подтверждается внедрением в технологический процесс обработки деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
2. Орликов М.Л. Динамика станков / М.Л. Орликов. Киев: Выща шк., 1989. 272 с.
3. Игнатъев С.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции / С.А. Игнатъев, В.В. Горбунов, А.А. Игнатъев. Саратов: СГТУ. 2009. 160 с.
4. Селезнева В.В. Вибродиагностика станков по результатам обработки / В.В. Селезнева // Надежность и диагностирование технологического оборудования. М.: Наука, 1987.С. 112-122.
5. Пуш А.В. Моделирование станков и станочных систем / А.В. Пуш // Конструкторско-технологическая информатика 2000: тр. 4-го межд. конгр. М.: Станкин, 2000. С. 114-119.
6. Игнатъев А.А. 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.
7. 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.
8. Игнатъев А.А. Экспериментально-аналитический метод определения передаточной функции динамической системы станка / А.А. Игнатъев, В.А. Каракозова // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2010, С. 90-92.

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 process control», Saratov state technical university.

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

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

А.А. Игнатьев, В.В. Коновалов, Т.В. Соколова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТОКАРНОГО СТАНКА ПРИ РЕЗАНИИ

Предлагается методика определения рационального режима точения по максимуму запаса устойчивости динамической системы (ДС) на основе ее идентификации по автокорреляционным функциям виброакустических колебаний.

Точение, подача резца, передаточная функция, виброакустические колебания, запас устойчивости

А.А. Ignatjev, V.V. Konovalov, T. Sokolova

EXPERIMENTAL ANALYTICAL DETERMINATION OF FUNCTION OF TRANSMISSION OF LATHE MACHINE TOOL DYNAMIC SYSTEM AT CUTTING

Methods of definition of rational regime of turning by means of maximal stability margin dynamic system (DS) determined according to indicator of vibrations and base of identification of dynamic system of lathe machine tool with help of autocorrelation functions of vibroacoustic vibrations chosen from experimental data is suggested.

Turning, parameter of technological regime, dynamic system, function of transmission, vibroacoustic vibrations, stability margin

Производительность и качество точения зависят от технического состояния станка и назначенных параметров режима обработки. Одной из важных характеристик станка, которая влияет на эффективность точения, является состояние его динамической системы (ДС), которое можно определить на основе измерения и анализа виброакустических колебаний (ВА) основных узлов формообразующей подсистем [1, 2].

Результаты обработки записей ВА колебаний при резании позволяют определить автокоррекционную функцию (АКФ) $K_{yy}(\tau)$ и на ее основе, при условии, что ДС станка возбуждается сигналом типа «белый шум», вычислить передаточную функцию замкнутой ДС $W_3(p)$ по формуле [3]

$$K_{yy}(p) + K_{yy}(-p) = W_3(p)W_3(-p), \quad (1)$$

где $K^{yy}(p)$ – изображение по Лапласу АКФ $K^{yy}(\tau)$.

Передаточная функция ДС может быть вычислена, если получено аналитическое выражение АКФ выходного сигнала, например, путем идентификации по экспериментально зарегистрированным ВА колебаниям резцового блока токарного станка при обработке.

Найденная передаточная функция $W_3(p)$ используется для определения рационального режима точения с наибольшей производительностью при обработке колец подшипников [4].

Критерием выбора такого режима является запас устойчивости ДС станка, определяемый из передаточной функции при различных значениях параметров процесса обработки, например, подачи инструмента, величины снимаемого припуска, скорости вращения заготовки и т.п. Этот подход ранее был апробирован на токарных станках [7], а затем на шлифовальных [6].

Эксперименты проводились по специальной методике. В производственных условиях оценивалась предварительная токарная обработка поверхности качения наружных колец железнодорожного подшипника 42726 из материала ШХ-15. Скорость вращения заготовки 180 об/мин, подача резца 0,2, 0,4, 0,5, 0,6 мм/об. В ходе испытаний было произведено исследование наружных колец в количестве по 9 штук подшипника 42726 и измерение ВА колебания резцового блока станка с целью выявления возможных дефектов и их влияния на параметры точности поверхностей колец подшипников и производительность [7].

В первом эксперименте резец Т5К10, применяемый по технологическому процессу в цехе № 20, во втором эксперименте резец PSON 2020 K12, пластина SNMM 120412 E-OR; 9230, фирмы «PRAMET».

Сигналы с вибродатчика подавались на виброизмеритель ВШВ-003М3 и регистрировались в режиме линейного усиления в диапазоне частот 1...4000 Гц/. Выход виброизмерителя подключался к компьютеру для визуального наблюдения формы и амплитуды вибросигналов в различных режимах работы станка, а также для записи и дальнейшей обработки результатов.

Эксперимент 1 – Обработка резцом Т5К10 по цеховому техпроцессу. Соответствующие подачам АКФ получены с помощью программы MATLAB.

Для аппроксимации АКФ используется формула

$$K(\tau) = A \cdot e^{-\alpha\tau} (1 + m \cos \Omega\tau) \cos \omega_0\tau \quad (2)$$

где A – постоянный коэффициент, α – коэффициент затухания, Ω – частота огибающей АКФ, ω_0 – основная частота АКФ, m – коэффициент модуляции.

Проверка моделей на адекватность проводилась по критерию Фишера.

Далее, используя формулу (1) и выполняя алгебраические преобразования, получаем выражение для передаточной функции в виде

$$W_3(p) = \frac{A(1+m)\sqrt{2}[(p+\alpha)^2 + \omega_0^2]}{[(p+\alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2][(p+\alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2]} \quad (3)$$

Следует отметить, что передаточная функция практически не изменяется за время обработки одного кольца (~ 1 мин) при неизменном режиме резания, то есть ДС рассматривается как линейная. При изменении режима точения (например, подачи резца) передаточная функция изменяется, то есть, в целом ДС станка является нелинейной.

Далее, по полученным передаточным функциям для четырёх подач инструмента вычисляется запас устойчивости ДС по показателю колебательности M . Минимальное значение M соответствует максимальному запасу устойчивости ДС, вычисляемому по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) ДС при резании, при котором обеспечиваются высокая производительность точения, заданное качество обработки дорожек точения колец и более низкая скорость износа инструмента, что согласуется с результатом работы.

Таким образом, экспериментально-аналитическое определение передаточной функции замкнутой ДС станка позволяет определить рациональный режим точения колец подшипников.

Для используемых подач резца получены различные АКФ, что свидетельствует о нелинейности ДС при резании. Однако для каждой подачи АКФ близки по виду, т.е. ДС можно рассматривать как линеаризованную и вычислить по АКФ с использованием соотношений (1) передаточную функцию замкнутой ДС $W_3(P)$. Далее, из каждой $W_3(P)$ вычисляется АЧХ, типичный вид которых приведен на рис. 1.

Затем вычисляется показатель колебательности M_{max} , характеризующей запас устойчивости ДС при резании. Результаты измерений приведены на рис. 2, которые показывают, что подача резца 0.6 мм/об является недопустимой из-за снижения запаса устойчивости ДС (повышение показателя колебательности) и повышение волнистости поверхности колец.

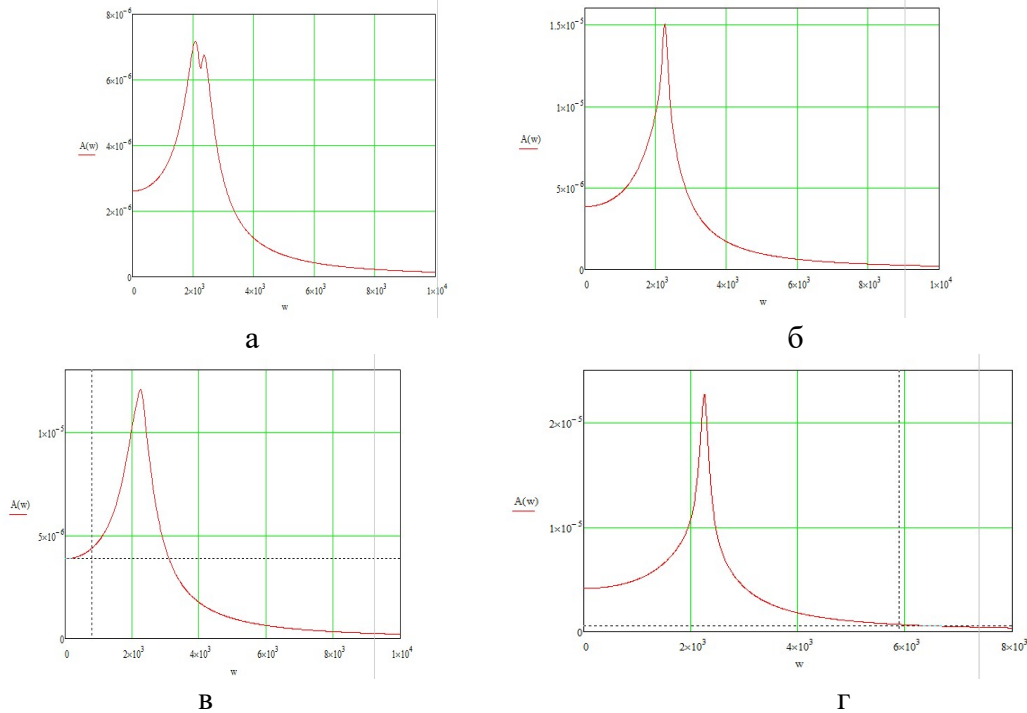


Рис. 1. Амплитудно частотные характеристики ДС на подачах:
а=0,2 мм/об, б=0,4 мм/об, в=0,5 мм/об, г=0,6 мм/об

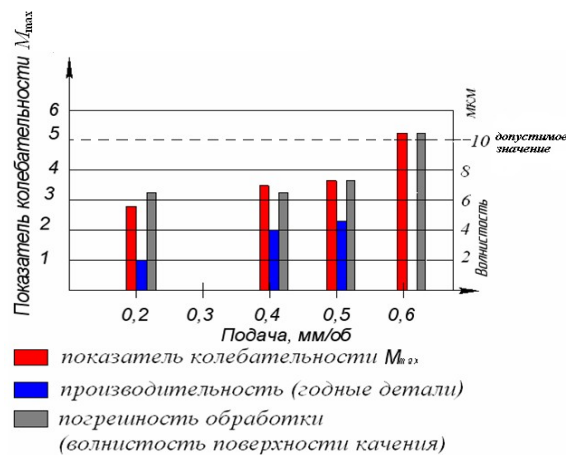


Рис. 2. Соотношение исследуемых показателей при точении колец резцом Т5К10
Количество измерений при каждой подаче – 9
Среднее квадратическое отклонение измерений волнистости – не более 0,5 мкм
СКО Mmax – не более 0,4

Рекомендуемая подача является 0,5 мм/об, которая превышает используемую 0,4 мм/об на данном станке в производственных условиях на 25%, т.е. производительность обработки повышается на 25%.

Эксперимент 2 – обработка резцом PSON 2020 K12, пластина SNMM 120412 E-OR; 9230, фирмы «PRAMET». Порядок проведения эксперимента аналогичен предыдущему.

Визуально наблюдается отличие АКФ при обработке различными резцами, соответственно различаются АЧХ (рис. 3) и показатель колебательности (рис. 4).

Вид АЧХ с двумя максимумами объясняется тем, что при изменении режима резания возбуждаются колебания в ДС как в двухмассовой (масса, связанная с инструментом и масса, связанная с заготовкой).

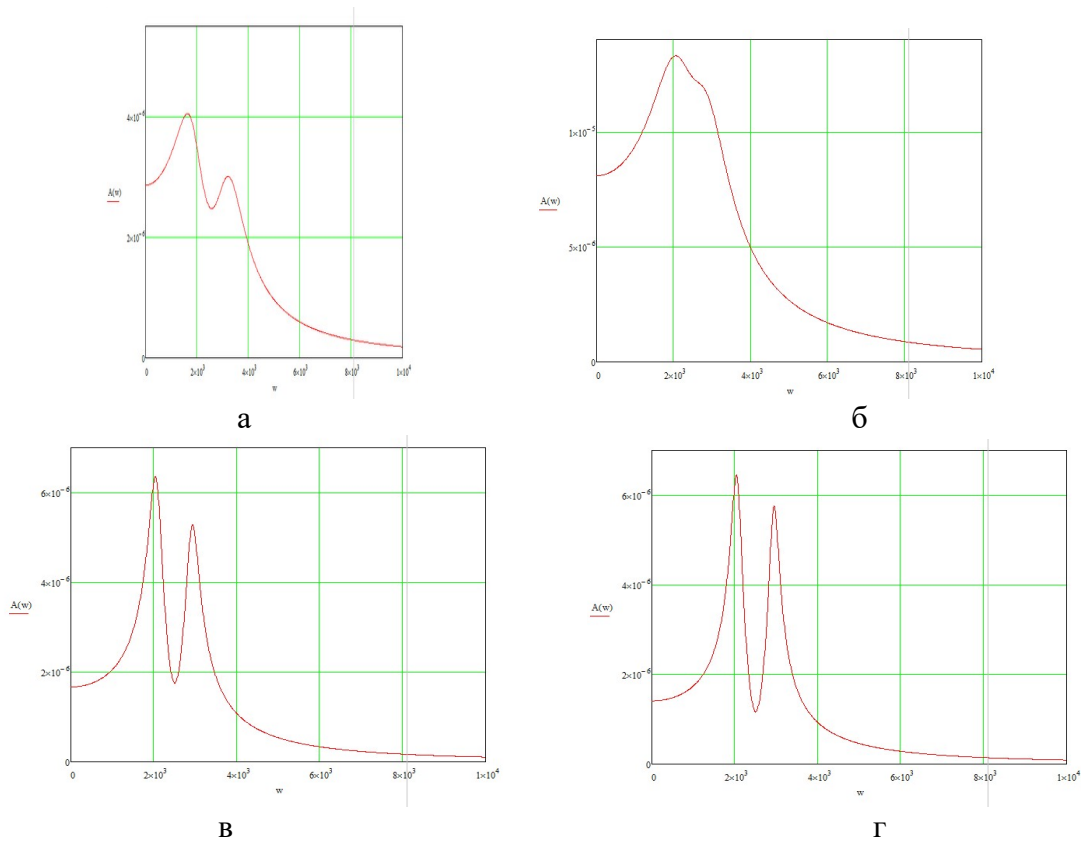


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики ДС на подачах:
 а=0,2 мм/об, б=0,4 мм/об, в=0,5 мм/об, г=0,6 мм/об

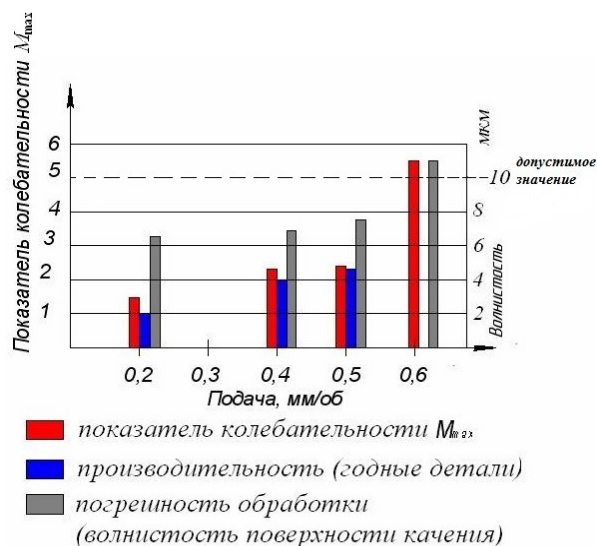


Рис. 4. Соотношение исследуемых показателей при точении колец резцом PSON 2020
 пластина SNMM 120412 E-OR; 9230
 Количество измерений при каждой подаче – 9
 Среднее квадратическое отклонение измерений волнистости – не более 0,5 мкм;
 СКО M_{max} – не более 0,4

Во втором эксперименте показатель M_{max} почти в 2 раза ниже аналогичного для эксперимента 1, что свидетельствует о более высоком запасе устойчивости ДС при обработке резцом PSON 2020 K12, пластина SNMM 120412 E-OR; 9230, рекомендуемая подача $n = 0,5$ мм/об.

Таким образом, экспериментально-аналитическое определение передаточной функции замкнутой ДС станка позволяет определить рациональный режим точения колец подшипников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А.Кудинов. М: Машиностроение, 1967. 359 с.
2. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков: в 3 ч. Ч.2 / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, В.В. Мартынов. Саратов: СГТУ, 1994. 156 с.
3. Скляревич А.Н. Операторные методы в статической динамике автоматических систем / А.Н. Скляревич. М.: Наука, 1956. 460 с.
4. Методы цифрового моделирования и идентификации стационарных случайных процессов/ А.Н. Лебедев, Д.Д.Недосекин, Г.А.Стеклова, Е.А. Чернявский. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 64 с.
5. Попов В.И. Динамика станков / В.И. Попов, В.И.Локтев. Киев: Техника, 1975. 136 с.
6. Коновалов В.В. Модель процессов в динамической системе токарного станка с учётом стохастических свойств сил резания / В.В.Коновалов, А.А.Игнатъев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. №2 (56). С. 230-233.
7. Точность и надёжность автоматизированных и прецизионных металлорежущих станков: в 3 ч. Ч.1 / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, В.В. Мартынов. Саратов: СГТУ, 1992. 160 с.
8. Игнатъев А.А. Выбор подачи круга для обеспечения качества обработки колец подшипников на основе идентификации динамической системы шлифовального станка / А.А.Игнатъев, В.А. Каракозова // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. №2(56). С. 69-73.
9. Коновалов В.В. Экспериментальное исследование точности обработки на токарных станках ТП-3503 и ПАБ-350 / В.В.Коновалов // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении. Сборник научных трудов Саратов: Саратовский государственный технический университет. 2011. С. 139-141.

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 process control», Saratov state technical university.

Коновалов Валерий Викторович – ассистент кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Konovалov Valeriy Viktorovich – assistant department Technology of machine the Saratov State Technical University

Соколова Татьяна Викторовна – аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета.

Sokolova Tatyana Viktorovna – Post-graduate Student of the Department of «Automation and process control», Saratov state technical university

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

А.А. Иванов, П.Ю. Бочкарев

**ОБЗОР ПРАВИЛ НАЗНАЧЕНИЯ ПРИОРИТЕТА ОПЕРАЦИЯМ
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
В МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

В статье проводится обзор различных приоритетных правил выбора конфликтных операций для целевой функции C_{max} при составлении расписаний для многономенклатурного механообрабатывающего мелкосерийного производства.

Планирование в цеху, приоритетные правила, job shop, планирование, мелкосерийное производство

А.А. Ivanov, P.Yu. Bochkaev

THE REVIEW OF APPLICATION OF SIMPLE PRIORITY RULES WHEN SCHEDULING FOR SMALL-SCALE PRODUCTION

In article the review of various priority rules of disputed operations for C_{max} objective function by drawing up of schedules for multinomenclature machining process small-scale production is carried out.

Shop scheduling, priority rules, job shop, scheduling, small-scale production

Современное машиностроение характеризуется преобладанием серийного и мелкосерийного производства [1, 2]. Многономенклатурное мелкосерийное производство выпускает на сегодняшний день более половины продукции 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, не оптимально 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 мелкосерийного производства задача составления оптимального расписания является наиболее актуальной [1, 2]. При таком типе производства сравнительно быстро прекращается изготовление одних видов выпускаемой продукции и налаживается освоение новых. 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 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.

Вернемся к вопросу создания самого расписания работы станочного оборудования. Идеализированным представлением многономенклатурного мелкосерийного производства является задача *job shop* (JS) [3]. Далее, придерживаясь терминологии [4], будем различать понятия *индивидуальной задачи* (т.е. задачи в которой все входные данные полностью определены) и *массовой задачи* (бесконечное семейство индивидуальных задач). Для краткости массовую задачу назовем просто «задачей» (например указанная задача *job shop*), а ее индивидуальную задачу будем называть «примером» (*instance*). Зафиксировав те или иные параметры задачи (например, число работ или число машин), мы получим *подзадачу*, или *класс примеров* исходной задачи. *Решение* задачи или примера будет означать нахождение расписания, т.е. моментов времени, когда начинается каждая операция.

Рассмотрим основные методы решения задачи JS. Глобальная классификация этих методов выглядит следующим образом: точные и неточные методы. К точным методам относятся метод полного перебора, метод сокращенного перебора, метод ветвей и границ и динамическое программирование. К неточным – методы назначения приоритетов, аппроксимационные методы и методы локального поиска (такие как Генетические алгоритмы, модельной «закалки», «узкого места», жадные алгоритмы и проч.). Наиболее эффективными и зарекомендовавшими себя на практике являются методы локального поиска, поскольку позволяют за приемлемое время построить достаточно «хорошее» расписание. Однако для нормальной работы этих методов им необходимо указать начальную точку поиска, т.е. фактически решить задачу и решить ее быстро. Для этих целей лучше всего и чаще всего используется метод назначения приоритетов. Метод назначения основывается на выборе функции предпочтения для каждой конфликтной ситуации, вызванной условием обработки только одной операции на одном станке, при построении расписания. Функций предпочтения существует огромное количество. Огромное количество обуславливается наличием огромного числа специфичных производств, для которых эти функции разрабатывались. Поскольку не существует единой функции предпочтения, обеспечивающей получения расписаний, близких к оптимальному при любом характере производственных ограничений и произвольной целевой функции, особую важность приобретает выбор приоритетных функций, обеспечивающих в конкретных условиях получение в короткие сроки решений, близких к оптимальным.

Различают два метода применения приоритетных правил (или приоритетных функций): детерминированный и стохастический. При детерминированном методе конфликт между операциями на станке определяется по экстремальному значению приоритетной функции. При стохастическом – используются «рандомизированные» приоритетные правила, т.е. операции выбираются случайно с вероятностью равной отношению приоритетной функции рассматриваемой операции к сумме функций всех конфликтных операций.

Приоритетные правила (в классификации Конвэя) делятся на локальные и глобальные. Локальные правила опираются только на информацию об операциях в конфликтном множестве, а для глобальных правил необходима информация о других деталях и станках.

Дальнейшая классификация делит правила на простые и составные. Простые основываются только на одном виде информации (локальной или глобальной), в то время как составные являются комбинациями простых правил. Составные приоритетные правила применяются в том случае, когда простые правила не обеспечивают однозначности выбора из конфликтного множества. Существует также разделение на статические и динамические правила. Значения статических правил является постоянным для каждой операции. В динамических такая зависимость присутствует.

Огромное множество различных правил представлено в [5]. Из них применительно к решению задачи JS было отобрано 11 наиболее значимых и часто встречающихся на практике простых правил.

Таблица 1

Описание используемых приоритетных правил

Обозначение	Выражение функции предпочтения	Описание
FCFS	$V_i(t) = T_{i,j}$	Первый пришел – первый обработан
RAND	$V_i(t) = R_{i,j}$	Равновероятная выборка операций
DDATE	$V_i(t) = D_i$	Самый ранний директивный срок
FOPNR	$V_i(t) = M_i - J + 1$	Наименьшее число оставшихся операций
GOPNR	$V_i(t) = -(M_i - J + 1)$	Наибольшее число оставшихся операций
SPT	$V_i(t) = P_{i,j}$	Самое короткое время обработки
LPT	$V_i(t) = -P_{i,j}$	Самое длительное время обработки
LWKR	$V_i(t) = \sum_{j=J}^{M_i} P_{i,j}$	Наименьшее оставшееся время обработки детали
MWKR	$V_i(t) = -\sum_{j=J}^{M_i} P_{i,j}$	Наибольшее оставшееся время обработки детали
NINQ	$V_i(t) = N_{i,J+1}(t)$	Наименьшее число операций в следующем конфликтном множестве
WINQ	$V_i(t) = W_{i,J+1}(t)$	Самое меньшее время обработки операций на следующей стадии обработки

Формализация, применяемая в Таблице 1.

t – момент времени, в котором производится выбор операции;

i – индекс деталей;

j – индекс операций одной детали;

J – индекс текущей операции;

M_i – общее число операций для i -й детали;

$T_{i,j}$ – момент готовности обработки операции j детали i ;

D_i – директивный срок i -й детали;

$P_{i,j}$ – время обработки операции j детали i ;

$R_{i,j}$ – произвольное значение от 0 до 1, присваиваемое операции j детали i ;

$N_{ij}(t)$ – число работ в момент t , находящихся в очереди вместе с операцией j детали i ;
 $W_{ij}(t)$ – время обработки всех операций в момент t , находящихся в очереди вместе с операцией j детали i ;

$V_i(t)$ – значение приоритетной функции i -й детали в момент t .

Критерий выбора очередной операции – минимум значения приоритетной функции.

Идея объединить простые приоритетные правила в более сложные позволяет получить большое разнообразие эвристик. Фактически можно связать различные базовые приоритетные функции, представленные выше, в различные функциональные зависимости, с целью получения сложных приоритетных функций, отражающих стремление удовлетворить особенности решаемой задачи.

Самые известные процедуры комбинации: аддитивная и альтернативная. (Деление и произведение правил относится к простым). Аддитивной или взвешенной комбинацией называется приоритет заданный выражением $Z_i(t) = \sum_{j=1}^n \alpha_j V_{ji}$, где V_{ji} определяет значение приоритета по простому приоритетному правилу j ($j = 1, \dots, n$) для работы i , а α_j определяет вес или коэффициент правила j ($\alpha_j \geq 0$). Весьма распространен специальный случай, когда ($0 \leq \alpha_j \leq 1$) и $\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1$, т.н. векторная или линейная комбинация.

Другая специфичная версия аддитивной комбинации представлена в [36]. Коэффициент α_j становится адаптивным компонентом внутри комбинационного выражения, тем самым достигается учет специфики задачи.

Альтернативный или иерархический подход основан на условной процедуре. В основном таким способом комбинируют только два простых правила. На примере двух простых правил SPT и FCFS, продемонстрируем три возможных способа альтернативной комбинации.

Первый, решение по использованию одного из двух правил зависит от значения slack (где slack это доступное время до наступления директивного срока):

$$V_i(t) = \begin{cases} SPT, & slack \leq 0 \\ FCFS, & slack > 0 \end{cases}$$

Второй, выбор правила может зависеть от сравнения числовых значений самих правил, например:

$$V_i(t) = \max\{SPT + r; FCFS\} \quad (-\infty < r < \infty)$$

Третий, применяется одно доминантное правило, а второе применяется в качестве арбитра, когда обе работы имеют одинаковое значение приоритета по первому правилу. Очевидно, что в данном случае возможно применение и большего количества правил.

Рассмотрим подход, предложенный О'Греди [6], который формализует концепцию приоритетных правил. Важность результатов этой статьи в том, что предложенное обобщенное аддитивное комбинационное выражение способно представить сразу несколько простых правил (с локальной информацией об очереди). Используется следующая нотация:

\underline{c} , \underline{b} : вектор коэффициентов оставшихся времен обработки операций работы;

\underline{p}_i : вектор, который содержит времена обработки оставшихся операций работы;

s : коэффициент директивного срока работы;

u , z : коэффициент числа оставшихся операций работы;

О'Греди определил следующую обобщенную приоритетную функцию:

$$V_i(t) = (\underline{c} \times \underline{p}_i) + (sd_i)$$

(где $\underline{c} \times \underline{p}_i = \sum_{q=1}^{m_i} c_q p_{iq}$). Некоторые простые правила являются частными случаями данного обобщенного выражения, например:

SPT: $\underline{c} = (1, 0, \dots, 0)$; $s = 0$;

DD: $\underline{c} = (0, 0, \dots, 0)$; $s = 1$;

SL: $\underline{c} = (-1, -1, \dots, -1)$; $s = 1$;

LWKR: $\underline{c} = (1, 1, \dots, 1)$; $s = 0$.

Если расширить функцию О'Грэди до приоритетной функции вида:

$$V_i(t) = \frac{(\underline{c} \times p_i) + (sd_i) + y(m_i - j + 1)}{(\underline{b} \times p_i) + z(m_i - j + 1)}$$

то с помощью нее может быть выражен более широкий диапазон правил, например:

SPT: $\underline{c} = (1, 0, \dots, 0)$; $\underline{b} = (0, \dots, 0)$;

$s = y = 0$; $z = 1/(m_i - j + 1)$;

FOPNR: $\underline{c} = (0, \dots, 0)$; $\underline{b} = (0, \dots, 0)$;

$s = 0$; $y = 1$; $z = 1/(m_i - j + 1)$;

LWKR: $\underline{c} = (1, \dots, 1)$; $\underline{b} = (0, \dots, 0)$;

$s = y = 0$; $z = 1/(m_i - j + 1)$;

$\alpha SPT + (1 - \alpha)S / OPN$ ($0 \leq \alpha \leq 1$);

$\underline{c} = ((m_i - j + 1)\alpha - (1 - \alpha), -(1 - \alpha), \dots, -(1 - \alpha))$; $\underline{b} = (0, \dots, 0)$;

$s = 1 - \alpha$; $y = 0$; $z = 1$;

и т.д.

Необходимо также определиться с выбором целевой функции для задачи JS. С точки зрения соответствия реальным задачам многономенклатурного мелкосерийного производства анализ влияния приоритетных функций было решено проводить на целевой функции S_{max} (значение функции равно максимальному времени обработки из всех деталей). Эта функция наиболее распространена в исследованиях планирования. Ее популярность объясняется следующими причинами. Во-первых, достижение высокой загрузки до сих пор является главной задачей управления производственным процессом в механообработке. Во-вторых, вычисление S_{max} облегчено за счет известных алгоритмов на графах для вычисления самого длинного пути в связанном графе решения.

В настоящий момент в большинстве статей, посвященных описанию правил приоритетов для задач составления расписаний, рассматриваются только усредненные целевые функции, такие как \bar{C} , \bar{T} , \bar{F} . Поэтому перед авторами стоит задача по анализу эффективности имеющегося множества простых и комбинированных приоритетных правил, применяемых в задачах планирования с целевой функцией S_{max} , созданию новых правил для указанного критерия, одновременно учитывающих специфику многономенклатурного мелкосерийного производства. Подобное исследование позволит в дальнейшем применить полученные результаты при разработке эффективных методов локального поиска решения для мелкосерийного производства, не маловажной особенностью которых является задание «хорошей» начальной точки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарев П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки // Технология машиностроения, № 1, 2002. С. 10-14.
2. Бочкарев П.Ю. Планирование технологических процессов в условиях многономенклатурных механообрабатывающих систем. Теоретические основы разработки подсистем планирования маршрутов технологических операций: Учебное пособие / П.Ю. Бочкарев, А.Н. Васин. Саратов: СГТУ, 2004. 136 с.
3. P. Brucker, «Scheduling Algorithms», Fifth edition, Springer, Heidelberg, 2007.
4. Севастьянов С.В. Докторская диссертация на тему «Геометрические методы и эффективные алгоритмы в теории расписаний».
5. Panwalkar, S. and I. Wafik. 1977. A survey of scheduling rule. Operations Research 25 (1):45-61.
6. O'Grady PJ, Harrison C (1985) A general search sequencing rule for job shop sequencing. Int J Prod Res 23:961-973

Иванов Александр Александрович – аспирант кафедры «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

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 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.941

Д.В. Козлов, А.А. Игнатъев

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Производится оценка устойчивости процесса врезного шлифования с учетом износа шлифовального круга

Динамическая система, шлифовальный станок, шлифовальный круг, передаточная функция, режущая способность круга

D.V. Kozlov, A.A. Ignatyev

DYNAMIC MODEL OF PLUNGE GRINDING ADJUSTED FOR GRINDING WHEEL WEAR

The article presents assessment of sustainability of plunge grinding with the grinding wheel wear

Dynamic system, grinding machine, grinding wheel, the transfer function, the cutting ability of the wheel

Математическая модель динамической системы при врезном шлифовании должна отражать взаимосвязи сил резания и регулирующих воздействий, учитывающих влияние на динамику процесса шлифования собственно процесса резания, износа шлифовального круга, упругой системы станка, а также «следов» обработки. В качестве основы принята модель, разработанная В.Н. Михелькевичем (рис.2) [1], однако в нее внесены важные изменения [5], одно из которых учитывает изменение коэффициента передачи объекта по приращению толщины среза $K_{рез}$. За регулирующее воздействие на процесс шлифования принята скорость суппорта поперечной подачи шлифовального круга v_c , а за выходную переменную объекта – радиальная составляющая силы резания F_y (рис.1).

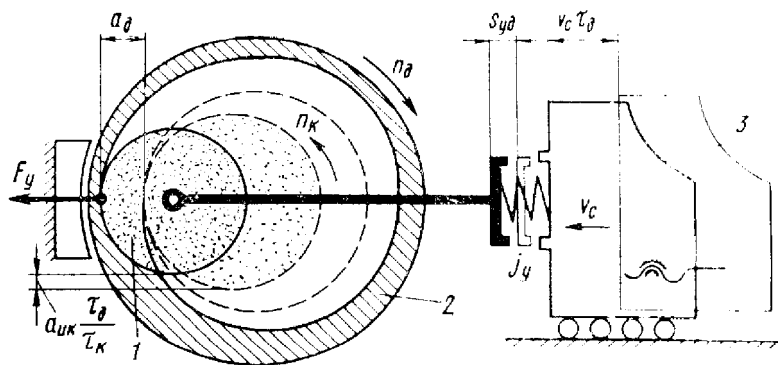


Рис.1. Упрощенная модель процесса врезного внутреннего шлифования:
1 – шлифовальный круг, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – суппорт подачи

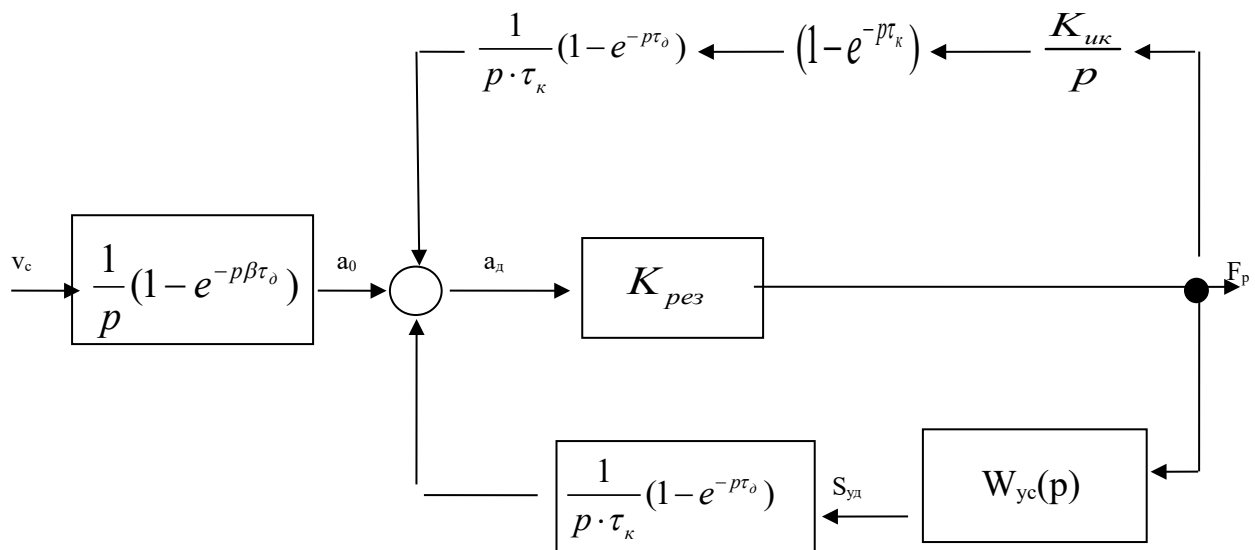


Рис.2. Структурная схема процесса врезного шлифования

Динамическая система станка представляет собой совокупность параллельно соединенных шпиндельного узла детали и шпиндельного узла инструмента, следовательно $W_{yc}(p) = W_{и}(p) + W_{д}(p)$.

Передаточные функции шпиндельного узла детали $W_{д}(p)$ и шпиндельного узла инструмента $W_{и}(p)$ в общем случае имеют сложную структуру, образованную совокупностью колебательных звеньев [2]. Выражения для них имеют вид

$$W_{д}(p) = \sum_{i=1}^n \frac{h_{дi}}{T_{дi}^2 p^2 + 2\gamma_{дi} T_{дi} p + 1}; W_{и}(p) = \sum_{j=1}^m \frac{h_{иj}}{T_{иj}^2 p^2 + 2\gamma_{иj} T_{иj} p + 1} \quad (1)$$

где $h_{дi}$, $h_{иj}$ – коэффициенты, обусловленные статической жесткостью отдельных элементов шпиндельного узла; $T_{дi}$, $T_{иj}$ – постоянные времени, обусловленные собственными частотами отдельных элементов шпиндельного узла; $\gamma_{дi}$, $\gamma_{иj}$ – относительные коэффициенты демпфирования отдельных элементов шпиндельного узла.

Рассмотрим передаточную функцию $W_{п}(p)$ шпиндельного узла инструмента как колебательное звено с одной основной частотой, а шпиндельного узла детали как безынерцион-

ное звено (поскольку узел имеет высокую жесткость и деталь вращается с относительно небольшой скоростью):

$$W_{и}(p) = \frac{h_{и}}{T_{и}^2 p^2 + 2\gamma_{и} T_{и} p + 1} ; \quad W_{д}(p) = h_{д} \quad (2)$$

С учетом вышеописанных формул, передаточная функция, соответствующая рис.2, будет выглядеть следующим образом:

$$W_p(p) = \frac{1}{p} \left(1 - e^{-p\beta\tau_d} \right) \frac{K_{PE3}}{1 + K_{PE3} \left(1 - e^{-p\tau_d} \right) \left[\left(\frac{h_{и}}{T_{и}^2 p^2 + 2\gamma_{и} T_{и} p + 1} + h_{д} \right) p + \frac{K_{ук}}{p\tau_k} \left(1 - e^{-p\tau_k} \right) \right]} \quad (3)$$

Коэффициент режущей способности шлифовального круга $K_{реж}$ связан с коэффициентом передачи объекта по приращению толщины среза $K_{рез}$ через время запаздывания τ_d . [1]

$$K_{реж} \cdot K_{рез} \cdot \tau_d = 1 \quad (4)$$

Изменение коэффициента режущей способности шлифовального круга во времени происходит по определенной закономерности и поэтому отражает степень затупления круга [3]

$$K_{реж} = K_{реж0} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (5)$$

С учетом формул (4) и (5) получаем

$$K_{рез}(t) = \frac{1}{K_{реж0} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \cdot \tau_d} = \frac{K \cdot e^{\lambda \cdot t}}{\tau_d} \quad (6)$$

Подставляя формулу (6) в (3) получаем:

$$W_p(p) = \frac{\frac{K}{(p - \lambda)}}{(p - \lambda)(T_{и}^2 p^2 + 2\gamma_{и} T_{и} p + 1) + K(p h_{и} + T_{и}^2 h_{д} p^3 + 2\gamma_{и} T_{и} p^2 + h_{д} p + K_{ук} T_{и}^2 p^2 + K_{ук} 2\gamma_{и} T_{и} p + K_{ук})} \quad (7)$$

Преобразуем числитель знаменателя передаточной функции

$$\begin{aligned} & T_{и}^2 p^3 + 2\gamma_{и} T_{и} p^2 + p - T_{и}^2 p^3 \lambda - 2\gamma_{и} T_{и} p - \lambda + K p h_{и} + K T_{и}^2 h_{д} p^3 + K 2\gamma_{и} T_{и} p^2 + \\ & + K h_{д} p + K K_{ук} T_{и}^2 p^2 + K K_{ук} 2\gamma_{и} T_{и} p + K K_{ук} = \\ & = (T_{и}^2 + K T_{и}^2 h_{и}) p^3 + (2\gamma_{и} T_{и} - T_{и}^2 \lambda + K 2\gamma_{и} T_{и} h_{и} + K K_{ук} T_{и}^2) p^2 + \\ & + (1 - 2\gamma_{и} T_{и} \lambda + K h_{д} + K h_{и} + K K_{ук} 2\gamma_{и} T_{и}) p + (K K_{ук} - \lambda) = \\ & = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 \end{aligned} \quad (7)$$

Далее подставим (7) в формулу передаточной функции и преобразуем ее:

$$W_p(p) = \frac{K(T_{и}^2 p^2 + 2\gamma_{и} T_{и} p + 1)}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} \quad (8)$$

Рассмотрим a_0 как $a_0 = K K_{ук} - \lambda$. По критерию устойчивости Гурвица при $a_0 > 0$ система считается устойчивой, при $a_0 < 0$ система неустойчива, т.е. переход от устойчивого состояния к неустойчивому определяется изменением коэффициента износа шлифовального круга $K_{ук}$, который изменяется с течением времени. В работе [4] подчеркивается, что коэффициент износа для шлифования, обеспечивающего высокую точность размера, дли-

тельное время является практически постоянным, а затем резко снижается до значения близкого к нулю. Именно после этого система переходит в неустойчивое состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михелькевич. М.: Машиностроение, 1975. 304 с.
2. Игнатъев А.А. Контроль технического состояния шлифовальных станков по вибрационным параметрам в процессе эксплуатации / А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, С.А. Игнатъев // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: сб.тр. межд.конф. Волжский, 2000. С. 240-242.
3. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов / Л.Н. Филимонов. Л.: Машиностроение, 1973. 136 с.
4. Лурье Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. М.: Машиностроение, 1969. 172 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 Alexander Anatolevich – Doctor of technical sciences, professor, head. Department «Automation and management of technological processes» the Saratov state technical university

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 681.5

Д.В. Козлов, А.А. Игнатъев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШЛИФОВАННЫХ ВАЛОВ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

Экспериментальное исследование шлифованных валов с помощью вихретокового дефектоскопа с целью выявления дефектов поверхностного слоя и определения оптимальной частоты правки шлифовального круга

Вихретоковый дефектоскоп, шлифовальный станок, шлифовальный круг, правка шлифовального круга

D.V. Kozlov, A.A. Ignatyev

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF GRINDED SHAFTS BY EDDY CURRENT METHOD

An experimental investigation of grinded shafts with eddy current flaw detector to detect defects in the surface layer and define the optimal frequency of grinding wheel

Eddy current flaw detector, grinding machine, grinding wheel, wheel dressing

Шлифование отличается от других операций механической обработки интенсивным локальным нагревом поверхности, что приводит к неоднородности структуры тонкого поверхностного слоя. Неоднородность поверхностного слоя способствует образованию и развитию очагов износа и разрушения деталей, поэтому процесс шлифования должен быть организован так, чтобы измененный поверхностный слой не выходил за пределы припуска на обработку и полностью удалялся к концу обработки. Эта задача решается применением средств автоматического управления режимами шлифования с контролем текущего припуска, а также применением средств послеоперационного контроля физико-механических свойств поверхностного слоя обработанных деталей [1]. Для выявления состояний поверхностного слоя, предшествующих структурным изменениям, в машиностроении для неразрушающего контроля шлифованных поверхностей применяются специально разработанные средства вихретоковой дефектоскопии. Метод вихревых токов применяется для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов изделий из электропроводных материалов [2-6].

Важной особенностью вихретокового метода неразрушающего контроля является то, что его проведение возможно без контакта объекта и преобразователя - их взаимодействие происходит на тех расстояниях, которые необходимы для свободного движения преобразователя относительно объекта (от долей миллиметра). Это дает возможность получать качественные результаты контроля даже при очень высоких скоростях исследуемых объектов. Этот метод пригоден для обнаружения таких дефектов как коррозия, износ, эрозия, трещины, повреждения и утончение стенок.

Дополнительным преимуществом вихретокового метода контроля является то, что на сигналы вихретокового преобразователя практически не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнения поверхности объекта контроля непроводящими веществами, а также простота конструкции вихретокового преобразователя.

С целью определения качества поверхности шлифованных валов и выбора оптимальной частоты правки шлифовального круга был проведен вихретоковый контроль на дефектоскопе ПВК-К2М (рис.1).

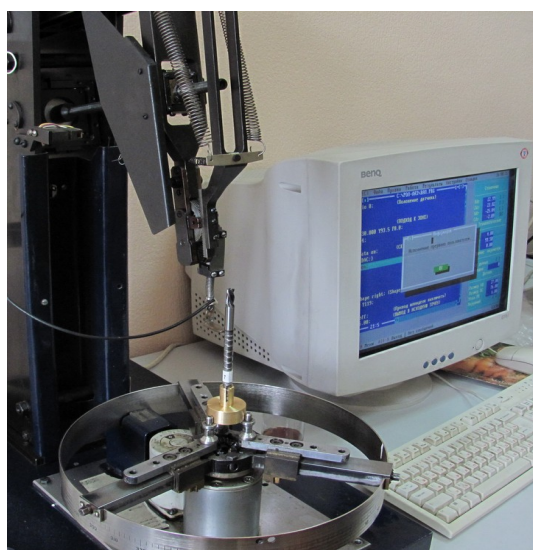


Рис.1. Вихретоковый дефектоскоп ПВК-К2М

На рис.2. представлена сканограмма вала, обработанного пятнадцатым по счету после правки шлифовального круга. Как видно из сканограммы, следы прижогов и микротрещины отсутствуют.

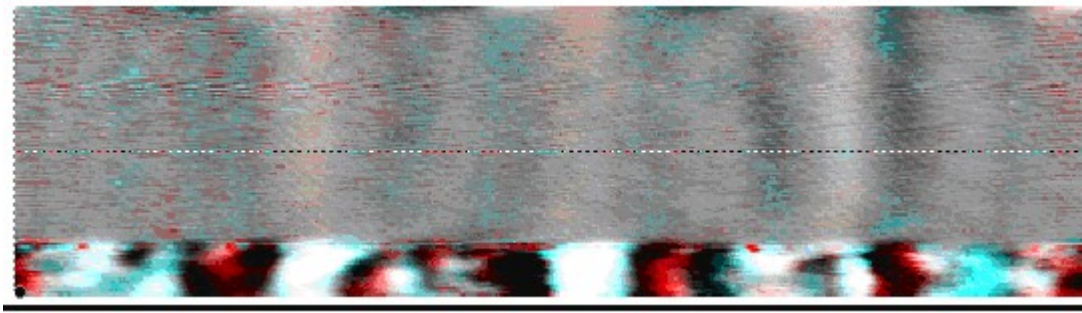


Рис.2. Сканограмма шлифованной цилиндрической поверхности рабочей части вала ротора №15, снятая на вихретоковом приборе ПВК-К2М по линии контроля на 64 обороте, в зоне диаметра шлифованной поверхности

Шлифовальный прижог был выявлен на сканограммах валов начиная с вала № 35 (рис.3).

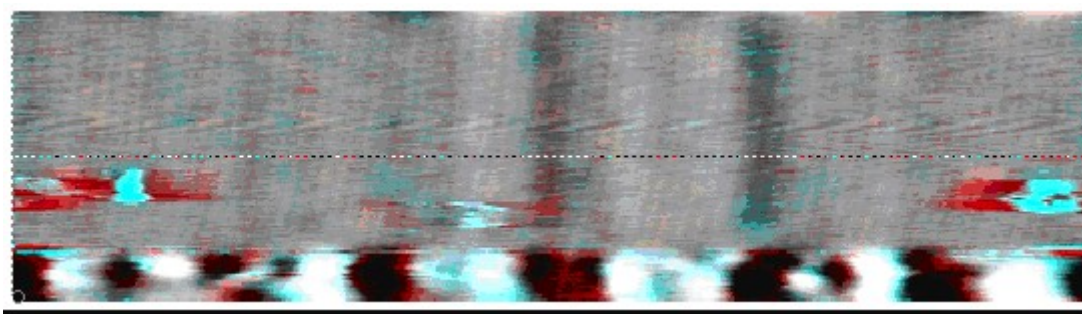


Рис.3. Сканограмма шлифованной цилиндрической поверхности рабочей части вала ротора №35, снятая на вихретоковом приборе ПВК-К2М по линии контроля на 64 обороте, в зоне диаметра шлифованной поверхности

Таким образом можно сделать вывод, что к этому моменту шлифовальный круг уже достаточно засален и его режущая способность падает [7]. С целью обеспечения оптимального качества шлифования целесообразно будет производить правку шлифовального круга через каждые 35 обработанных валов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Д.В. Экспериментальное исследование шлифованных валов вихретоковым методом / Д.В. Козлов, А.А. Игнатъев // Прогрессивные технологии в современном машиностроении. 8я международная научно-техническая конференция. Пенза. 2012. С. 15-17.
2. Игнатъев А.А. Автоматизированная вихретоковая дефектоскопия деталей подшипников / А.А. Игнатъев, В.В. Горбунов, А.М. Чистяков // СТИН. 2002. № 4. С. 17-19.
3. Соболев В.С. Накладные и экранные датчики (для контроля методом вихревых токов) / В.С. Соболев, Ю.М. Шкарлет. Новосибирск: Наука, 1967. 144 с.
4. Дорофеев А.Л. Электромагнитная дефектоскопия / А.Л. Дорофеев, Ю.Г. Казаманов. М.: Машиностроение, 1980. 280 с.
5. Ярошек А. Д. Токовихревой контроль качества деталей машин / А.Д. Ярошек, Г.С. Быструшкин, Б.М. Павлов. Киев: Наукова думка, 1976. 124 с.
6. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник: в 2 кн. Кн. 2 / Под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 1986. 352 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

Игнатьев 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. Department «Automation and management of technological processes» the Saratov state technical university

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК

А.В. Королев, А.А. Королев, А.С. Носков

БЕЗАБРАЗИВНОЕ СУПЕРФИНИШИРОВАНИЕ

Приведены результаты поискового исследования безабразивного ультразвукового суперфиниширования дорожек качения подшипников. Показано, что безабразивное суперфиниширование обеспечивает существенное повышение качества обработки дорожек качения и стабилизирует значения показателей качества

Ультразвуковое выглаживание, поверхностно-упрочняющая обработка, суперфинишная обработка

A.V. Korolev, A.A. Korolev A.S. Noskov

ULTRASONIC SUPERFINISH PROCESSING

The results of the pilot study nonabrasive ultrasonic kovogo superfinishing bearing raceways. It is shown that non-abrasive superfinishing provides significant improvement of quality of treatment raceways and stabilize the value of quality

Ultrasonic processing, strengthening process, superfinish processing

В настоящее время, при окончательной обработке беговых дорожек колец шарикоподшипников, применяется суперфиниширование. Однако отечественные суперфинишные бруски обладают недостаточно высокой стойкостью, что приводит к потере ими первоначальной формы в процессе обработки. В результате, искажается профиль получаемой дорожки качения. Значительный разброс значений показателей качества после абразивного суперфиниширования приводит к нестабильности работы подшипников. Особенно этот дефект характерен при суперфинишировании колец малогабаритных подшипников.

Одним из способов стабилизации показателей качества обработки деталей подшипников является процесс безабразивного ультразвукового суперфиниширования. При воздействии на материал детали инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой, в тонком поверхностном слое обрабатываемой поверхности происходит локальное разупрочнение кристаллической решетки за счет увеличения подвижности дислокации, получивших дополнительную энергию. В результате материал под воздействием инструмента течет, изменяя на микроуровне форму обрабатываемой поверхности. Таким образом, появляется возможность безабразивного формообразования деталей в пределах микронеровностей поверхности, в том числе закаленных до больших значений HRC.

С целью определения возможности повышения качества обработки деталей после суперфиниширования и отработки технологической схемы и режима обработки осуществлялся эксперимент. Исследования проводились на ультразвуковом вертикально-прошивочном станке модели 4Д772Э. В качестве образцов использовались внутренние кольца подшипников 206 после операции абразивного суперфиниширования дорожек качения.

Схема обработки приведена на рисунке. Обрабатываемые кольца 1 устанавливались на гладкой цилиндрической оправке 4 в призме 3, имеющей поперечный паз, соизмеримый с высотой колец. Призма крепилась на столе станка болтами. Инструмент 2 представлял собой волновод с твердосплавным наконечником. Он устанавливался в шпинделе станка, прижимался с заданной силой к обрабатываемой поверхности и выставлялся по отношению к обрабатываемой заготовке с некоторым смещением относительно оси ее вращения так, что в процессе обработки под действием ультразвуковых колебаний заготовка получала вращение.

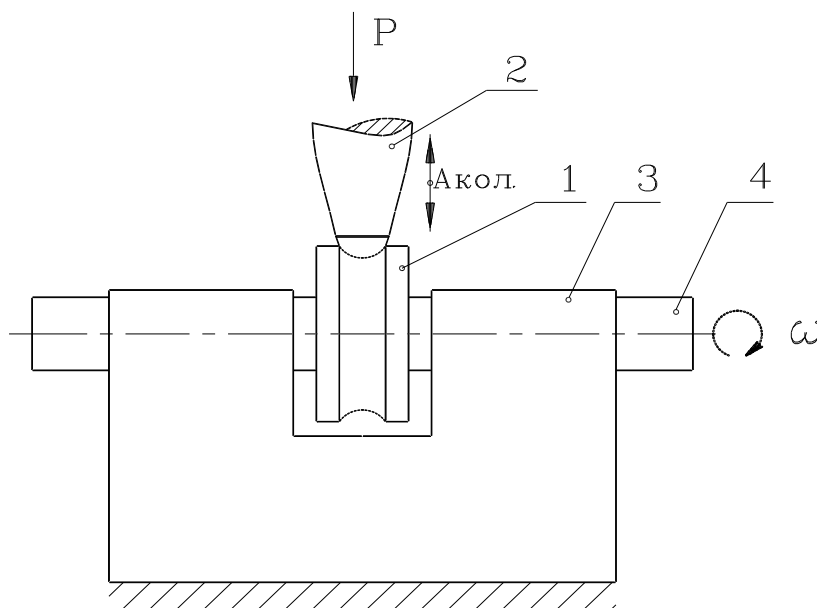


Рис. 1. Схема безабразивного суперфиниширования: 1. Опытный образец- внутреннее кольцо шарикового подшипника. 2. Инструмент-волновод с твердосплавным сферическим наконечником. 3. Призма. 4. Цилиндрическая оправка

Время обработки составляло 10, 15 и 30 сек.

Результаты исследований приведены в таблице.

Таблица - Влияние времени обработки и усилия прижима инструмента к обрабатываемой поверхности на показатели безабразивной суперфинишной обработки дорожек качения колец подшипников

№ п/п	Сила прижима, кгс	Время обработки, сек	Амплитуда колебаний, мкм	Оклонение от круглости, мкм		Волнистость, мкм		Огранка, мкм		Шероховатость поверхности, Ra мкм		Радиус профиля дорожки качения, мм	
				0,96	0,8	0,51	0,50	0,61	0,41	0,26	0,26	3,07	3,12
1	15	10	5	1,49	0,65	0,22	0,22	0,72	0,32	0,34	0,16	3,08	3,11
2	15	10	5	1,3	1,15	0,32	0,30	0,74	0,55	0,34	0,22	3,08	3,10
3	10	6	5	1,34	1,3	0,51	0,44	0,75	0,73	0,26	0,16	3,09	3,11
4	15	4	5	0,92	0,96	0,45	0,32	0,61	0,44	0,22	0,16	3,09	3,11
5	10	6	5	2,48	1,51	0,95	0,41	1,12	0,85	0,34	0,22	3,12	3,12
6	30	12	5	0,92	0,96	0,54	0,32	0,63	0,51	0,34	0,16	3,10	3,10
7	30	4	5	1,95	1,41	0,4	0,33	0,71	0,63	0,34	0,16	3,09	3,10
8	10	6	5	0,77	0,65	0,32	0,30	0,42	0,45	0,26	0,16	3,08	3,10
9	30	6	5	1,26	1,19	0,35	0,40	0,64	0,63	0,22	0,2	3,09	3,10
10	15	4	5	1,0	0,96	0,51	0,40	0,53	0,52	0,34	0,26	3,09	3,12
11	15	12	5	1,34	1,65	0,61	0,60	0,63	0,50	0,26	0,24	3,12	3,12
12	15	12	5	1,31	1,10	0,47	0,38	0,68	0,55	0,29	0,20	3,09	3,11
Среднее значение				1,31	1,10	0,47	0,38	0,68	0,55	0,29	0,20	3,09	3,11
СКО				0,49	0,33	0,19	0,10	0,17	0,15	0,05	0,04	0,02	0,01

Из таблицы видно, что по всем показателям обработки безабразивное суперфиниширование существенно повышает качество обработанной поверхности. Особенно сильное влияние результаты безабразивной обработки оказывают на шероховатость обработанной поверхности, которая снижается почти в 2 раза. Значительное влияние безабразивная обработка оказывает также на волнистость и гранность поверхности.

Но особенно важно, что после указанной обработки существенно снижается среднее квадратическое отклонение показателей обработки, повышается стабильность значений показателей качества. Значительно уменьшается разброс значений радиуса профиля дорожек качения, что, как известно, оказывает положительное влияние на работоспособность подшипников.

На основе выполненных исследований предложен рациональный режим безабразивного суперфиниширования:

- время обработки - 15 сек;
- сила прижима инструмента - 10 кгм
- амплитуда колебаний – 5 мкм.

Представленные результаты исследований позволяют разработать промышленную технологию производства прецизионных подшипников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Житников Ю.З. Величина наклепа при ультразвуковом деформационном упрочнении / Ю.З. Житников, В.А. Волобуев // Автоматизация и современные технологии 2001. № 6. С. 3-4
2. Курс физики: учебник для вузов: в 2 т. Т.2. 2-е изд. / Под ред. В.Н. Лозовского. СПб.: Изд-во «Лань», 2001 592 с.
3. Лесюк Е.А. Влияние режима ультразвуковой упрочняющей обработки на качество обрабатываемой поверхности / Е.А. Лесюк, В.П. Алехин, Ким Чанг Сик. Весник машиностроения. 2008. № 9. С. 52-55.

Королев Альберт Викторович – профессор, д.т.н., заведующий кафедрой «Технология машиностроения»

Korolev, Albert V. – PhD in Science, professor, head of the Technology of Machine,

Саратовского государственного
технического университета

Saratov State Technical University

Королев Андрей Альбертович –
профессор, д.т.н., кафедры
«Технология машиностроения»
Саратовского государственного
технического университета

Korolev Andrey A. –
PhD in Science, professor, head
of the Technology of Machine,
Saratov State Technical University

Носков Александр Сергеевич –
аспирант кафедры «Технология
машиностроения» Саратовского
государственного технического
университета

Noskov, Aleksandr S. –
postgraduate student of the Technology
of Machine, Saratov State Technical Uni-
versity

УДК 621.43-19

С.П. Косырев, И.О.Кудашева

НЕПОЛНАЯ УПРУГОСТЬ МЕТАЛЛОВ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ФОРСИРОВАННЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Рассмотрено влияние пластической деформации на геометрические параметры и нестабильность структур металла. Выявлено, что упругое последствие влияет на стабильность размеров прецизионных деталей. Сделано заключение о том, что неупругие эффекты являются причиной внутреннего трения, характеризующего необратимые потери энергии механических колебаний внутри металла прецизионных высоконагруженных деталей.

Ключевые слова: неполная упругость металлов, технологические остаточные напряжения, прецизионные детали

S.P.Kosyrev, I.O. Kudasheva

INCOMPLETE ELASTICITY OF THE METAL PRECISION PARTS BOOSTED DIESELS

The influence of plastic deformation on the geometric parameters and the instability of the metal structure. Revealed that the elastic effect affects the dimensional stability of precision parts. It is concluded that inelastic effects are the cause of internal friction of irreversible loss of energy of mechanical vibrations in heavy-metal precision parts.

The keywords: partial elasticity of metals, technological residual stresses, high-precision parts

Пластическая деформация значительно влияет на геометрические параметры и нестабильность структур металла, так как при динамическом знакопеременном нагружении метал-

ла зависимости между напряжениями и деформациями являются нелинейными и в области упругой деформации у материалов наблюдается ряд отклонений от чисто упругого поведения. Часть энергии расходуется в металле на необратимые процессы и определяется площадью петли гистерезиса, образованной знакопеременным циклом нагружения и вызываемой внутренним трением (демпфированием) конструкции. Причинами рассеяния энергии в металлах при напряжениях, близких к пределу усталости, являются релаксационные и другие процессы, связанные с несовершенствами реального кристаллического тела (включения, атомы внедрения, дислокации, границы зерен); магнитоупругий и термоупругий эффекты и микропластические деформации в отдельных перенапряженных зернах поликристалла.

Одним из известных проявлений неполной упругости металлов является эффект Баушингера, заключающийся в том, что при повторном нагружении пластически слабо деформированного образца в обратном направлении его сопротивление пластическим деформациям снижается и у некоторых сталей и титановых сплавов может достигать 15-20% [1].

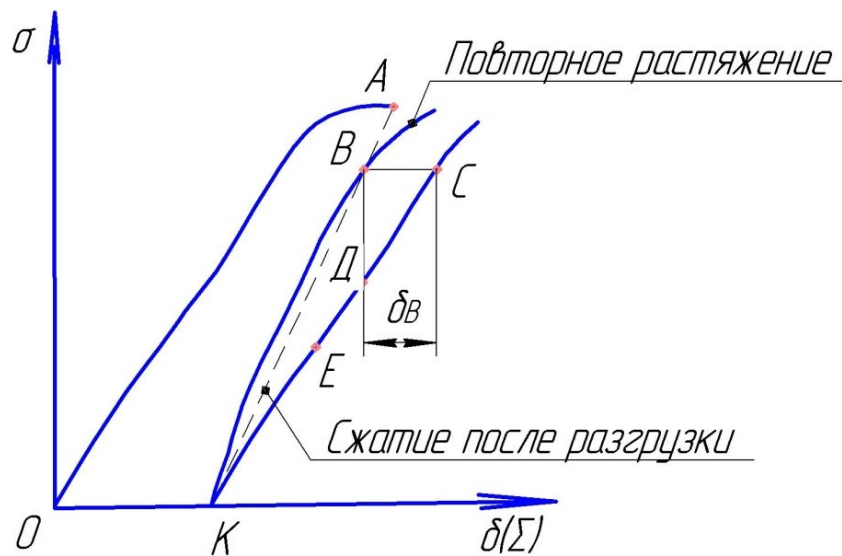


Рис. 1. Схема эффекта Баушингера

Допустим, что образец растягивается на 1-2% (до точки А на рис.1), а после снятия нагрузки подвергается сжатию. Кривая напряжения-деформации КЕС будет лежать ниже соответствующей кривой КВ, которая получена при повторном растяжении. Если точка В соответствует началу пластической деформации, то отрезок ВС= σ_B представляет собой так называемую баушин-герофскую деформацию, которая является одной из основных количественных характеристик и зависит от предварительной деформации и размера зерна. Влияние размера зерна связывается с влиянием общей поверхности границ зерен, являющихся источником возникновения микроискажений, и возможностью прохождения значительных деформаций внутри крупных зерен.

Важным проявлением неполной упругости металлов является упругое последствие, свидетельствующее о том, что не вся обратимая деформация металла является чисто упругой. Если в образце создаются напряжения в пределах упругого участка кривой напряжения – деформации, то после разгрузки такой образец будет иметь те же размеры, что и до нагружения (рис.2).

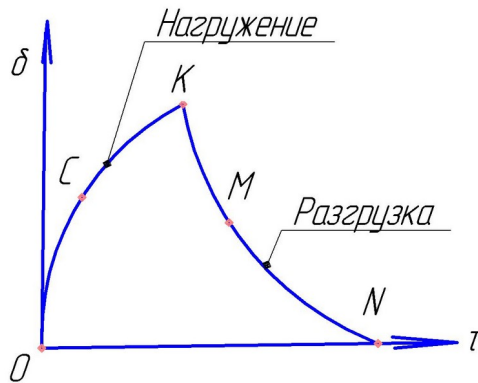


Рис. 2. Схема упругого последствия образца-свидетеля

Чисто упругая деформация образца наблюдается лишь на участке OC , после чего он удлиняется медленно. После разгрузки в точке K происходит очень быстро снятие чисто упругой деформации ($KM-OC$), а затем — относительно медленное — остальной деформации. В точке N напряжение снижается до 0, образец возвращается к исходным размерам, но очевидно, что не вся обратимая деформация является чисто упругой.

Более общей причиной упругого последствия считается структурная и химическая неоднородность металлов прецизионных деталей форсированных дизелей. При динамических напряжениях значительно ниже тех, которые вызывают макроскопическую пластическую деформацию, в отдельных зернах начинается локальная (микроскопическая) деформация, связанная с перемещением дислокаций. Когда на металл конструкций прецизионных деталей действует постоянное напряжение, после почти мгновенной упругой деформации до точки C (рис. 2) удлинение может продолжаться за счёт микроскопической деформации, постепенно затухая из-за сопротивления упругой среды, окружающей пластически деформирующиеся объёмы. После разгрузки упруго продеформированные участки не могут полностью вернуться в исходное состояние, так как этому препятствуют пластически продеформированные области. Под действием начальных технологических остаточных напряжений (НТОН) в этих областях постепенно идет обратная пластическая деформация, которая приближает размеры образца-свидетеля к исходным.

Упругое последствие влияет на стабильность размеров прецизионных деталей. Например, из-за него после деформационной правки может возникать изменение формы конструкции прецизионных деталей.

Упругое последствие влияет на стабильность размеров прецизионных деталей. Например, из-за него после деформационной правки может возникать изменение формы конструкции прецизионных деталей. Скорость упругого последствия, а также его значение зависят от состава, структуры материала нагруженной детали и условий её обработки. Неоднородность пластической деформации, облегчение её под действием различных факторов усиливают эффект упругого последствия. Таким образом, в металлах конструкции прецизионных деталей ещё до начала макропластической деформации (на упругом участке кривой напряжение — деформация) возможны неупругие явления, такие как движение дислокаций, точечных дефектов, перемещение атомов в области границ зерен и т.д. Эти явления, сопровождающиеся местными пластическими деформациями, наблюдаются при низких напряжениях ($10^{-5}G$, где G — модуль сдвига) и имеет важное практическое значение. При вибрационном старении явление упругого последствия играет большую роль. Под влиянием НТОН происходит переориентирование атомов углерода и азота в стали. Эти явления не связаны с дислокациями. Основное условие возникновения внутреннего трения, связанного с присутствием точечных дефектов в решетке, — асимметричность дефекта, т.е. дефект только тогда может быть центром релаксации, когда искажённая кристаллическая решетка имеет более низкую симметрию, чем неискаженная. Тогда, если дефект создает несимметричную деформацию решетки, приложение внешней нагрузки должно вызвать определенное перераспределение

дефектов между позициями, которые они занимал в недеформированном кристалле. Характерный пример релаксационных явлений такого типа – затухание динамических напряжений, связанные с перемещением внедренных атомов в металлах с объемно-центрированной кристаллической решеткой.

Неупругие эффекты являются причиной внутреннего трения, характеризующего необратимые потери энергии механических колебаний внутри металла прецизионных высоконагруженных деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. Изв-во иностр. Литературы, 1962, 594 с.

Косырев Сергей Петрович – доктор технических наук, академик, профессор кафедры «Управление и информатика в технических системах» Балаковского института техники, технологии и управления (филиала Саратовского государственного технического университета)

Kosyrev Sergey Petrovich – doctor of technical sciences, the academician, the professor of department «Management and information science in engineering systems» The Balakovo institute for equipment, technology and control (Branch) Saratov State Technical University

Кудашева Ирина Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиала Саратовского государственного технического университета)

Kudasheva Irina Olegovna – Candidate in Technical Sciences, the docent of department «Technology and the automation of machine building» The Balakovo institute for equipment, technology and control (Branch) Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.91.01

Д.Е. Лазарев, Т.Г. Насад

ДИАГРАММА КОНТРОЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

В процессе данного исследования была разработана диаграмма контроля процесса для прогнозирования типа и размера заусенцев, возникающих при сверлении отверстий в деталях из нержавеющей стали. С помощью предлагаемой диаграммы возможно предсказать тип и размер заусенцев при заданных значениях подачи и скорости резания, а значит, возможно повысить качество обработки отверстия и снизить в процессе сверления роль такого негативного фактора, как образование заусенцев.

Сверление, заусенцы, диаграмма контроля процесса, нержавеющая сталь

D.E. Lazarev, T.G. Nasad

THE CONTROL CHART OF DRILLING BURR IN STAINLESS STEEL

The control chart for prediction of burr type and size in drilling process of stainless steel was developed. With the proposed chart can predict the type and size of the burr at given values of feed and cutting speed and thus may improve quality and reduce processing holes the negative factor - burr formation during the drilling process.

Drilling, burr, control chart process, stainless steel

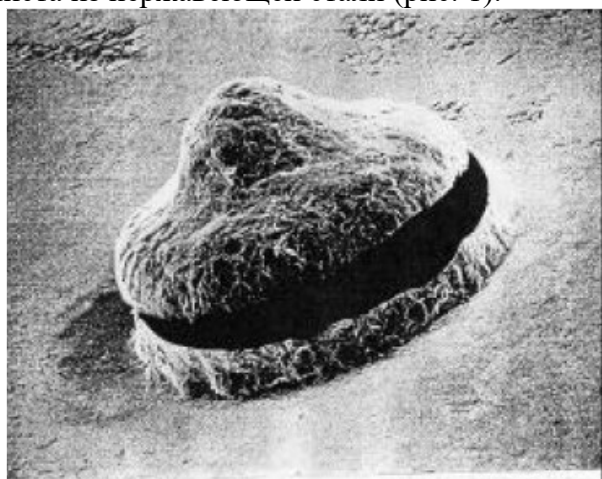
Возникновение заусенцев в процессе механической обработки отверстий является негативным фактором, снижающим эффективность процесса резания, требующим дополнительных операций для удаления заусенцев из обработанного отверстия, что вызывает определенные технологические трудности. Как следствие, увеличивается время на обработку, усложняется и удорожается технологический процесс. Разработка методов для контроля возникновения заусенцев является актуальной задачей машиностроительных производств.

Целью данного исследования является создания диаграммы контроля для прогнозирования типа и размера заусенцев, возникающих при сверлении отверстий в деталях из нержавеющей стали.

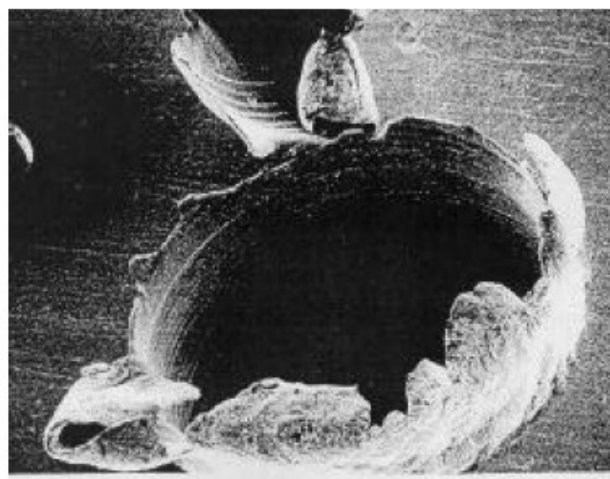
Экспериментальные данные: заготовка – лист толщиной 6,5мм из стали 03X18H11; материал сверла – быстрорежущая сталь Р6М5, угол при вершине сверла – 135° , угол наклона винтовой канавки – $32,5^\circ$; в заготовке сверлятся отверстия диаметром 4мм.

Размер возникающих заусенцев зависит от конкретного типа заусенцев, поэтому в данном исследовании был проведен контроль именно типа заусенцев. Отмечу также, что прогнозировать тип заусенцев проще, чем размер.

Ниже представлены изображения двух типов заусенцев, образующихся при сверлении листа из нержавеющей стали (рис. 1).



(а) Тип «крышка»



(б) Тип «корона»

Рис.1. Два типа заусенцев при сверлении отверстий в нержавеющей стали

Рассмотрим различия в процессе образования заусенцев для форм «крышка» и «корона» (рис. 2).

Механизм образования формы заусенцев «крышка». В момент, когда сверло подходит к выходу из отверстия, материал под режущей кромкой начинает деформироваться, причем расстояние от точки выхода сверла из отверстия до точки начала деформации материала зависит от силы резания. Важно отметить, что в процессе продвижения сверла в отверстии зона пластической деформации расширяется от центра к краю сверла. В заключительной ста-

дии механической обработки материал изгибается и выталкивается из отверстия, образуется заусенец типа «крышка» (рис. 2, а).

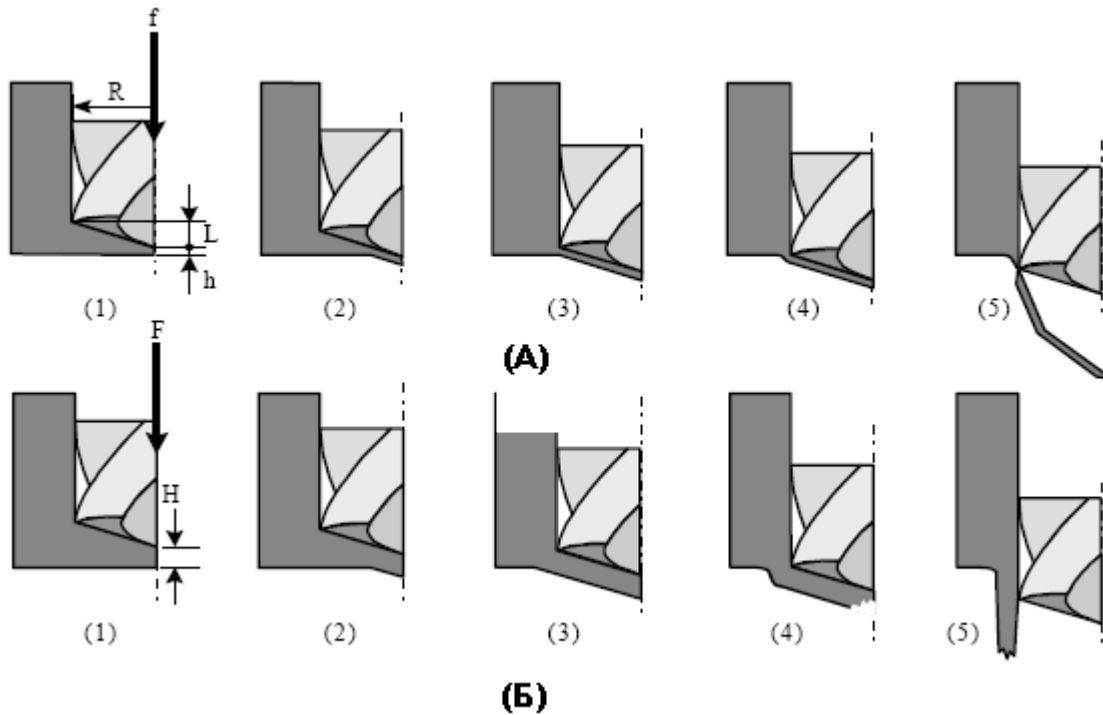


Рис. 2. Процесс образования заусенцев (а) – тип «крышка», (б) – тип «корона»

Сила резания большая, чем в первом случае, вызывает возникновение пластической деформации материала в начале процесса, после вхождения сверла в отверстие. В этом случае толстый слой материала перед режущей кромкой сверла подвергается интенсивному процессу пластической деформации, вызывая большее напряжение на выходе из отверстия. В результате разрыв материала происходит в центре отверстия при выходе сверла. Затем материал изгибается, выталкивается из обрабатываемого отверстия, образуя заусенцы типа «корона» (рис. 2, б).

В процессе исследования отметим три категории заусенцев. Категория I – высота заусенцев составляет 5% от диаметра сверла; категория II – высота заусенцев составляет от 5% до 15% от диаметра сверла. Обе категории относятся к заусенцам типа «крышка». Хотя заусенцы категории I и категории II имеют одинаковый механизм образования, категория I имеет меньшую высоту, что предпочтительнее в большинстве случаев [1].

Категория III – высота заусенцев составляет более 45% от диаметра сверла, это заусенцы типа «корона» [1].

Так как геометрия сверла и вид материала остаются неизменными, определяющими параметрами процесса являются режимы резания и диаметр сверла, причем контролируемые параметрами будут величина подачи и скорость резания. Скорость резания вычисляется из значения числа оборотов шпинделя и значения диаметра сверла, по формуле:

$$V = \frac{n \cdot \pi \cdot d}{1000}, \quad (1)$$

где n – число оборотов шпинделя, об/мин; d – диаметр сверла, мм.

На диаграмме (рис. 3) по оси X отложены значения скорости резания V , м/мин. По оси Y отложены значения подачи, мм/об. С помощью данной диаграммы, исходя из установленных режимов резания, есть возможность прогнозировать категорию заусенцев, получаемых в процессе сверления отверстия. Также, на диаграмме выделена зона опасных для

инструмента режимов – зона повышенного износа инструмента и, как следствие, поломки сверла.

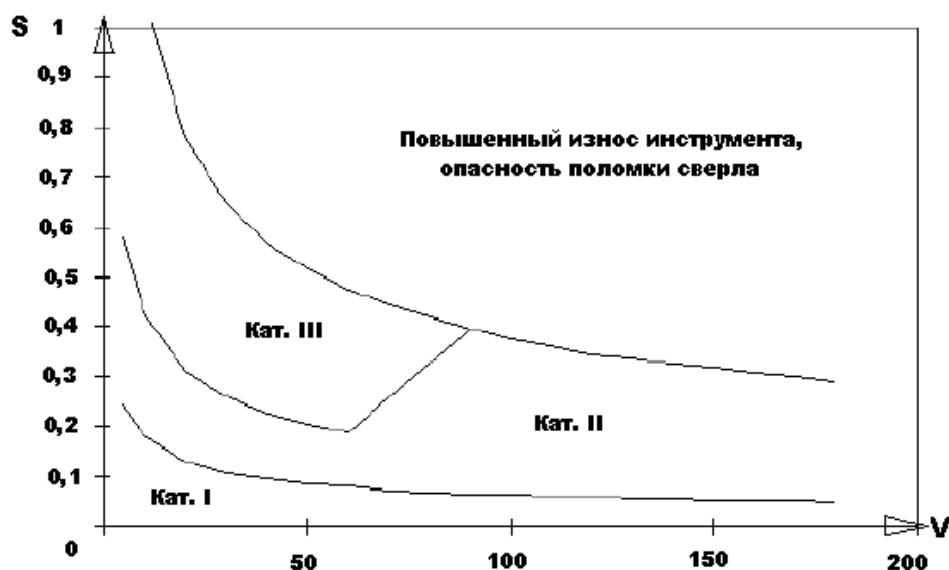


Рис. 3. Диаграмма контроля процесса образования заусенцев

Заключение. В процессе данного исследования была разработана диаграмма контроля процесса для прогнозирования типа и размера заусенцев, возникающих при сверлении отверстий в деталях из нержавеющей стали. Прогнозирование и контроль возникновения заусенцев делают процесс обработки отверстий более эффективным. С помощью предлагаемой диаграммы возможно предсказать тип и размер заусенцев при заданных значениях подачи и скорости резания, а значит, возможно повысить качество обработки отверстия и снизить в процессе резания роль такого негативного фактора, как образование заусенцев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stein, J.M. Burr Formation in Precision Drilling of Stainless Steel: Ph.D. Dissertation, The University of California at Berkeley, 1995.
2. Sofronas, A. The Formation of Control of Drilling Burr: Ph.D. Dissertation, The University of Detroit, 1975.

Лазарев Дмитрий Евгеньевич – аспирант кафедры «Технологии и оборудование электрохимических и электрофизических методов обработки материалов» Энгельского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Lazarev Dmitriy Evgenyevich – post-graduate student of «Technologies and equipment for electrochemical and electrophysical methods of material processing» of Engels Technological Institute (branch) Saratov State Technical University

Насад Татьяна Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологии и оборудование электрохимических и электрофизических методов обработки материалов» Энгельского технологического института (филиала) Саратовского государственного

Nasad Tatyana Gennadievna – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department «Technologies and equipment for electrochemical and electrophysical methods of material processing» of Engels Technological Institute (branch) Saratov State Technical University

Д.Е. Лазарев, Т.Г. Насад**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ
И ТОЧНОСТИ РАЗМЕРОВ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ**

В данной работе проведен анализ метода вихревого растачивания точных отверстий. Установлено, что в процессе механической обработки происходит периодическое резание, аналогичное фрезерованию. Преимуществом данного метода обработки отверстий является разделение стружки на отдельные фрагменты, образование элементной стружки. Также, преимуществом метода вихревого резания является обеспечение высокого качества обработки поверхности, высокой точности размеров, малой огранки и малого увода инструмента.

Растачивание отверстий, качество поверхности, точность размеров, расточной инструмент

D.E. Lazarev, T.G. Nasad**IMPROVING OF SURFACE QUALITY AND DIMENSIONAL ACCURACY DURING
BORING OF DEEP HOLES**

In this paper the method of vortex boring of precise holes was analyzed. There is periodically cutting during the processing of holes, similar to milling. The advantage of this method is the separation of chip into separate fragments, the formation of elemental chip. Also, the advantage of the vortex cutting is providing a high quality surface and high dimensional accuracy, low surface defects and low cutting tool deviation.

Holes boring, surface quality, dimensional accuracy, boring tool

Из всех разновидностей обработки деталей резанием наиболее сложной и трудоемкой является расточка глубоких отверстий. Трудоемкость обработки заключается в недостаточной жесткости системы станок-приспособление-инструмент-деталь, невозможности контроля над процессом резания и низкой производительности.

Целью исследования является повышение качества механической обработки и точности размеров, снижение огранки и увода режущего инструмента при растачивании глубоких отверстий.

Для расточки отверстий существуют принципиально два различных вида инструмента: с определенностью и неопределенностью базирования (рис. 1).

В первом случае при сложении всех составляющих сил резания, действующих на отдельные режущие лезвия инструмента, результирующее усилие теоретически должно быть равно нулю (развертки, зенкера, сверла и т. д.) [2].

На практике за счет различных отклонений, вызванных неточностью изготовления инструмента, неоднородностью материала детали, неравномерным припуском, приходящимся на каждое лезвие, этого не происходит. Возникает результирующая сила $R_{рез}$, величина и направление которой являются случайными величинами, что может привести к вибрациям, действующим на инструмент при недостаточной жесткости технологической системы. В

инструментах с определенностью базирования результирующая сила находится в пределах угла ψ расположения направляющих шпонок, которые ее воспринимают, поэтому в данном случае обеспечивается лучшее качество обработки, меньше огранка и увод инструмента.

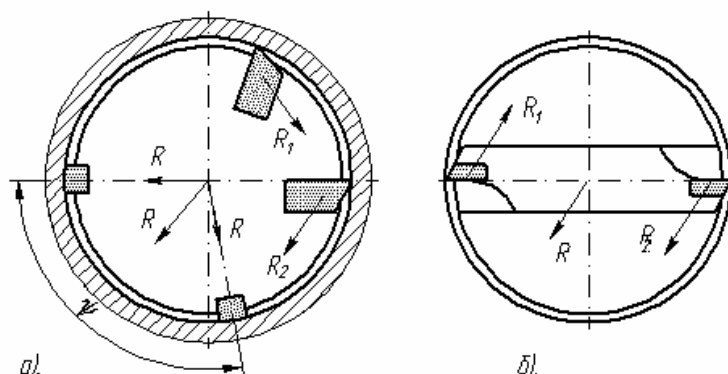


Рис. 1. Расточные инструменты с определенностью (а) и без определенности (б) базирования

Рассмотрим схему с определенностью базирования. По данной схеме может производиться обработка скоростным фрезерастачиванием или, как указывается в некоторых литературных источниках, вихревым резанием (рис. 2). Обработка производится резцовой головкой 1, содержащей один или несколько режущих элементов 2. Резцовая головка установлена с возможностью вращения в борштанге 3 с частотой вращения n_n , большей, чем частота вращения детали n_d , причем вращение детали может быть попутным или встречным. В процессе работы для фиксации резцовой головки 1 от смещения в поперечном направлении и предотвращения поперечных колебаний на стебле закреплены направляющие шпонки 4. Ось вращения резцовой головки смещена относительно оси заготовки на некоторую величину δ , называемую эксцентриситетом, в результате чего сьем металла при растачивании может происходить в зоне резания, расположенной в пределах дуги окружности обрабатываемого отверстия от точки А до точки В. При изменении частоты вращения резцовой головки сечение срезаемого слоя будет меняться [2].

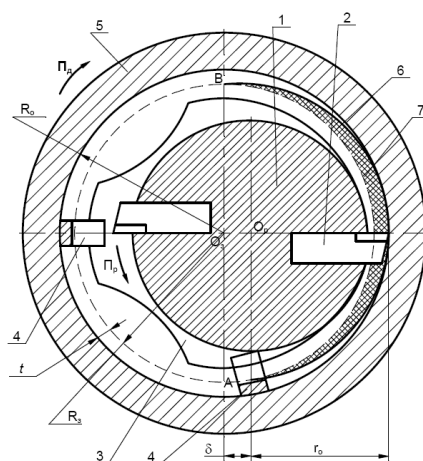


Рис. 2. Схема вихревого растачивания отверстий
 1 – резцовая головка; 2 – резец-вставка; 3 – борштанга; 4 – направляющая;
 5 – обрабатываемая деталь; 6 – сегмент срезаемой стружки

Параметры зоны резания: полухорда a и углы ψ_o и ψ_u (рис. 3) при невращающейся детали вычисляются из равенств:

$$a = \sqrt{R_3^2 - \left(\frac{R_3^2 - r_\delta^2 + \delta^2}{2 \cdot \delta} \right)}, \quad (1)$$

$$\delta = R_3 - r_\delta, \quad (2)$$

$$R_3 = R_0 - t, \quad (3)$$

$$\psi_\delta = 2 \cdot \arcsin \frac{a}{R_3}, \quad (4)$$

$$\psi_u = 2 \cdot \arcsin \frac{a}{r_a}. \quad (5)$$

где R_0 , R_3 , r_a – радиусы обработанного отверстия, заготовки и окружности, описываемой вершинами резцов режущей головки. При вращении детали рабочая зона увеличится в окружном направлении, в связи с чем, принимая во внимание поворот детали, данные формулы примут другой вид:

$$\psi_\delta = \psi + \xi = \psi \cdot \left(1 + \frac{n_\delta}{n_p} \right), \quad (6)$$

$$a = R_3 \cdot \sin \psi_\delta, \quad (7)$$

$$\psi_u = \arcsin \frac{a}{r_a}. \quad (8)$$

Если в резцовой головке установлено одновременно z_u резцов, то их траектории будут смещены по дуге окружности обрабатываемого отверстия относительно друг друга на угол η :

$$\eta = \frac{\psi_u \cdot n_\delta}{n_u \cdot z_u} = \frac{2 \cdot \arcsin(a/r_a) \cdot n_\delta}{n_u \cdot z_u}. \quad (9)$$

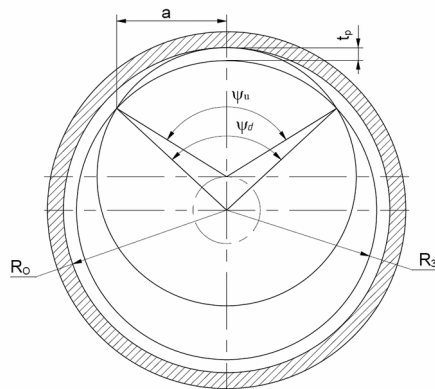


Рис. 3. Параметры зоны резания при вихревом растачивании отверстий

Заключение. В данной работе проведен анализ метода вихревого растачивания точных отверстий. Установлено, что в процессе механической обработки происходит периодическое резание, аналогичное фрезерованию. Преимуществом данного метода обработки отверстий является разделение стружки на отдельные фрагменты, образование элементной стружки. Еще одним преимуществом метода вихревого резания является обеспечение высокого качества обработки поверхности (параметр шероховатости $R_a 0,8 \dots R_a 0,4$), высокой точности размеров (6...7 квалитет точности), малой огранки и малого увода инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минков М.А. Технология изготовления глубоких точных отверстий / М.А. Минков. М.: Машиностроение, 1975. 76 с.

2. Отений Я.Н. Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий / Я.Н. Отений, Н.Я. Смольников, Н.В. Ольштынский. РПК «Политехник», Волгоград, 2003. 178 с.

3. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты: Учебник для вузов. 3-е изд., переработанное и дополненное / П.Р. Родин. К.: Высшая школа, 1986. 455 с.

Лазарев Дмитрий Евгеньевич – аспирант кафедры «Технологии и оборудование электрохимических и электрофизических методов обработки материалов» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Lazarev Dmitriy Evgenyevich – post-graduate student of «Technologies and equipment for electrochemical and electrophysical methods of material processing» of Engels Technological Institute (branch) Saratov State Technical University

Насад Татьяна Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологии и оборудование электрохимических и электрофизических методов обработки материалов» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Nasad Tatyana Gennadievna – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department «Technologies and equipment for electrochemical and electrophysical methods of material processing» of Engels Technological Institute (branch) Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.91.01

Д.Е. Лазарев, Т.Г. Насад

РЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ

В данной работе проведен анализ конструкций режущих инструментов с целью повышения качества и производительности механической обработки точных отверстий. Рассмотрены следующие инструменты: головки для чистового растачивания глубоких отверстий, многорезцовая расточная головка, плавающая двухрезцовая расточная головка. Выявлены преимущества предлагаемых режущих инструментов, проведен анализ методов механической обработки точных отверстий.

Режущий инструмент, чистовая обработка, расточные головки, хонингование

D.E. Lazarev, T.G. Nasad

CUTTING TOOLS FOR IMPROVING OF QUALITY AND PRODUCTIVITY OF PRECISE HOLES PROCESSING

In this paper the design of cutting tools was analyzed. The objective of the development is improving of the quality and productivity of precision holes machining. The following tools were developed: tool for boring deep holes, boring tool with several cutters and boring tool with two cutters. The advantages of the proposed cutting tools were defined, analysis of precision holes processing was carried out.

Cutting tool, finish processing, boring tools, honing

Для чистовой обработки отверстий используют различные по конструкции резцовые головки. Выбор того или иного инструмента зависит от глубины обрабатываемого отверстия, физико-механических свойств обрабатываемого материала, диаметра отверстия, требуемой точности и производительности. Для чистовой обработки отверстий с диаметрами больше 70 мм с последующим раскатыванием роликами наиболее часто применяются головки с плавающими блоками резцов. Они позволяют получить достаточно высокую точность обработанного отверстия в пределах 6...8 квалитетов точности за счет большой жесткости резцов в радиальном направлении. Поэтому погрешность зависит только от настройки резцов на заданный размер, которая осуществляется вне станка с точностью (0,001...0,01) мм. В промышленном производстве преимущественно используются головки резцовые с призматическими плавающими блоками, установленными в прямоугольном пазу, выполненном в корпусе инструмента с возможностью радиального смещения блока под воздействием разности сил резания, действующих на противоположно расположенные резцы.

В представленной на рис. 1,а базовой резцовой головке, помимо достижения точности размеров, необходимо назначить допуски на отклонение от параллельности противоположно расположенных поверхностей и перпендикулярности смежных стенок паза, в котором расположен резцовый блок, что вызывает определенные технологические трудности. Перечисленные недостатки легко устраняются применением цилиндрического плавающего резцового блока (рис. 1,б).

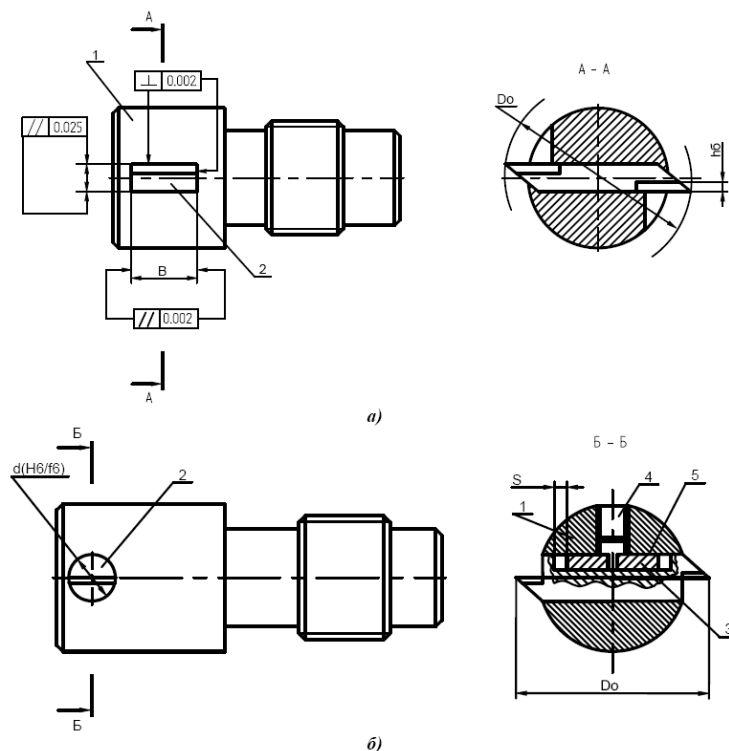


Рис. 1. Головки для чистового растачивания глубоких отверстий:

а) применяемая в производстве; б) предлагаемая

Предлагаемая резцовая головка состоит из корпуса 1, внутри которого установлен цилиндрический плавающий блок 2. Для предотвращения поворота резцового блока 2 в его корпусе расположена призматическая шпонка 3 с отверстием, в которой вставлен штифт 4 [2]. В этом случае в корпусе резцовой головки необходимо обработать одну цилиндрическую поверхность, заданная точность которой может быть обеспечена различными методами такими, как протягивание, развертывание, внутреннее шлифование, тонкое растачивание. Преимуществом использования данного инструмента является снижение времени на переналадку благодаря конструкции с применением цилиндрического плавающего резцового блока.

Для повышения производительности и снижения огранки при вихревом растачивании необходимо увеличить количество зубьев в инструменте. В современных фрезах, которые можно использовать при вихревом растачивании в качестве режущих элементов, используются резцовые вставки. Они имеют большие габариты, поэтому возможное их количество, устанавливаемое одновременно в инструменте, ограничено. С целью увеличения количества одновременно устанавливаемых в корпусе инструмента резцов предлагается конструктивное решение резцовой головки, изображенное на рис. 2.

В данной конструкции применяются твердосплавные пластины прямоугольного сечения, которые устанавливаются в специально подготовленные для них в корпусе инструмента пазы. Крепление пластин осуществляется коническими штифтами [2].

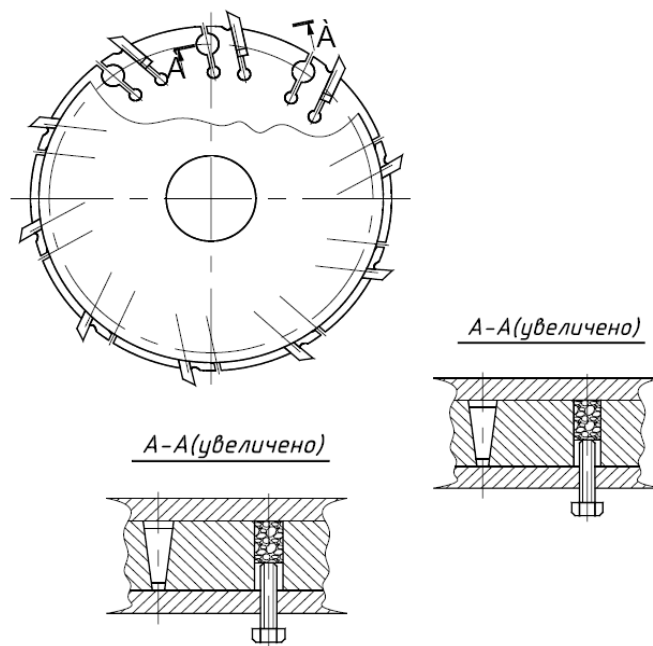


Рис. 2. Многорезцовая расточная головка с установкой большого количества режущих элементов

Особенности обработки точных отверстий – недостаточная жесткость применяемого инструмента и высокая склонность к упругим деформациям под воздействием усилия обработки. С увеличением глубины отверстия резко возрастают трудности при обеспечении высокой производительности, требуемого и стабильного качества поверхности. Как следствие, из всех цилиндрических поверхностей деталей различного назначения, применяемых в машиностроении, наиболее трудоемкими и сложными в обработке являются глубокие отверстия.

Выбор того или иного метода обработки отверстия зависит от его размеров и точности, свойств материала заготовки, требований к качеству поверхностного слоя и производительности. При черновых операциях преимущественно используют токарную обработку сверлами, зенкерами, развертками, резцовыми головками, а при чистовых операциях – тонкое растачивание, абразивную обработку – внутреннее шлифование и хонингование. Для по-

вышения качества поверхностного слоя широко применяются методы ППД: выглаживание, обкатывание роликами, дорнование. Для обеспечения требований по качеству, точности и достижению заданной шероховатости поверхности необходимо наличие в технологии как черновой, так и чистовой обработки.

На черновых операциях применяются токарно-винторезные, обдирочно-бесцентрово-шлифовальные станки, при этом используется инструмент и оснастка, учитывающие особенности обработки отверстий. При черновой обработке возникают нежелательные явления, такие как вибрации, появляющиеся в связи с тем, что инструмент в процессе обработки подвергается большим крутящим и изгибающим моментам, увеличивается податливость технологической системы, возникают трудности подвода смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ), затруднено удаление стружки из зоны резания, невозможность непосредственного визуального контроля над процессом обработки и др. [1].

Применение люнетов, поддерживающих борштангу и обрабатываемый инструмент, значительно снижает производительность из-за большого вспомогательного времени, связанного с необходимостью их установки, переустановки и подготовкой установочных поверхностей. Повышение производительности и приведение равнодействующей сил резания, действующих на нежесткую заготовку, к нулю, можно достичь применением многолезцовых головок, которые оснащены несколькими режущими элементами, расположенными равномерно по окружности вокруг обрабатываемой поверхности. Резцы могут быть настроенными на заданный размер, или с возможностью перемещения в радиальном направлении, причем либо жестко друг относительно друга, либо автономно.

На рис. 3 представлена конструкция плавающей двухрезцовой головки, имеющей возможность радиального смещения вследствие радиального биения заготовки [2].

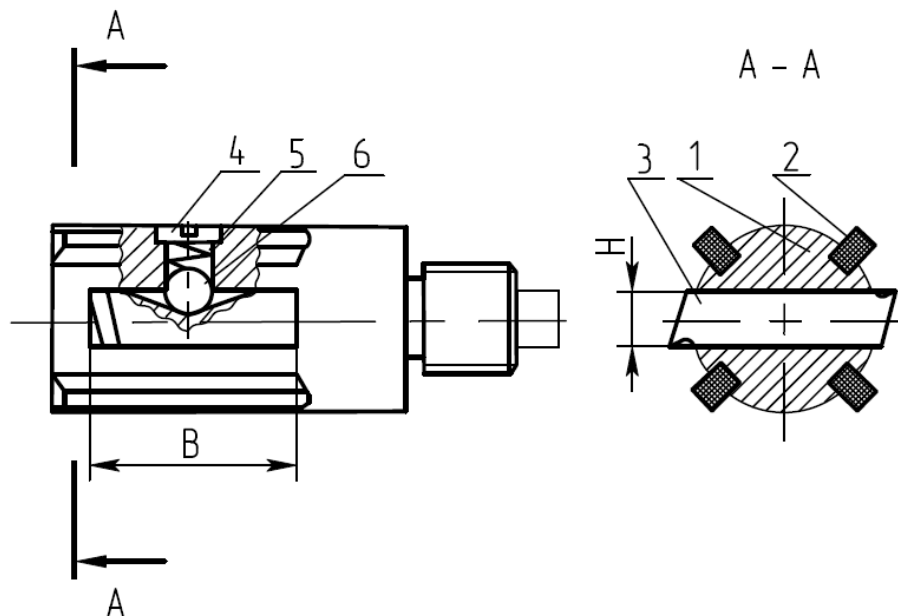


Рис. 3. Плавающая двухрезцовая расточная головка: 1 – оправка, 2 – направляющая шпонка, 3 – плавающий резец, 4 – штифт, 5 – пружина, 6 – шарик

Настройка на размер в такой головке обеспечивается перемещением режущих элементов относительно друг друга в радиальном направлении, в том случае, когда он является сборным или заточкой, когда резец является цельным. Поскольку плавающий блок резцов обладает большой жесткостью, то обеспечиваемая точность размеров может находиться в пределах 7...9 квалитета. Однако подобные резцовые головки относятся к инструментам без определенности базирования. Это означает, что под действием различных факторов, таких как неточность настройки каждого из резцов, различной степени их износа, неоднородности материала детали и припуска на обработку, на заготовку действует равнодействующая сил

резания, отличная от нуля и имеющая неопределенное направление, что приводит к дополнительным погрешностям и вибрациям. В этом отношении обработка отверстий с подвижными шпонками, установленными на борштанге соответствующим образом более предпочтительна, т.к. результирующее усилие резания имеет направление между опорными направляющими шпонками, установленными на корпусе инструмента.

В качестве чистовой обработки для обеспечения низкой шероховатости ($Ra = 0,12...0,63$ мкм) может применяться различная абразивная обработка или поверхностное пластическое деформирование. Обработка глубоких отверстий шлифованием возможна только уравновешенным инструментом. Суммарная составляющая радиальных сил, действующих на инструмент, в этом случае должна быть равна нулю. К такому виду обработки относится хонингование. Несмотря на то, что хонингование является одним из точных методов обработки, позволяет достичь низкой шероховатости, тем не менее по производительности уступает другим методам, в том числе и тонкому растачиванию, а обработка малоуглеродистых незакаленных сталей при хонинговании приводит к быстрому засаливанию абразивных шлифовальных кругов, что требует частой правки и вызывает повышенный расход абразивного материала.

Заключение. В данной работе проведен анализ конструкций режущих инструментов с целью повышения качества и производительности механической обработки точных отверстий. Рассмотрены следующие инструменты: головки для чистового растачивания глубоких отверстий, многолезцовая расточная головка, плавающая двухлезцовая расточная головка. Выявлены преимущества предлагаемых режущих инструментов, проведен анализ методов механической обработки точных отверстий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минков М.А. Технология изготовления глубоких точных отверстий / М.А. Минков. М.: Машиностроение, 1975, 76 с.
2. Отений Я.Н. Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий / Я.Н. Отений, Н.Я.Смольников, Н.В. Ольштынский. РПК «Политехник», Волгоград, 2003. 178 с.
3. Соломенцев Ю.М. Технологические основы оптимизации процесса обработки деталей на станках / Ю.М. Соломенцев. М., 1974. 48 с.

Лазарев Дмитрий Евгеньевич – аспирант кафедры «Технологии и оборудование электрохимических и электрофизических методов обработки материалов» Энгельского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Lazarev Dmitriy Evgenyevich – post-graduate student of «Technologies and equipment for electrochemical and electrophysical methods of material processing» of Engels Technological Institute (branch) Saratov State Technical University

Насад Татьяна Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологии и оборудование электрохимических и электрофизических методов обработки материалов» Энгельского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Nasad Tatyana Gennadievna – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department «Technologies and equipment for electrochemical and electrophysical methods of material processing» of Engels Technological Institute (branch) Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 629.113.004.67

Д.Н. Макеев

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛУЧЕНИЯ
И ОБРАБОТКИ ПОКРЫТИЙ С ИНТЕРМЕТАЛЛИДАМИ**

Приводиться описание методики экспериментальных исследований получения интерметаллидных покрытий с помощью наплавки под слоем флюса, а так же обработки покрытий резцами на токарном станке с дальнейшим исследованием физических свойств поверхностного слоя.

Методика эксперимента, получение интерметаллидных покрытий, токарная обработка, проведение экспериментальных исследований для контроля параметра шероховатости

D.N. Makeev

TECHNIQUE OF PILOT STUDIES OF RECEIVING AND PROCESSING OF COVERINGS WITH INTERMETALLIDAMI

Include a description of the methods of experimental research of receipt of intermetallide coverings with the help of surfacing under the layer of flux, as well as the processing of coatings on the lathe with further investigation of the physical properties of the surface layer.

An experiment technique, receiving intermetallidny coverings, turning processing, carrying out pilot studies for control of parameter of a roughness

В качестве объекта исследования выступает деталь круглого сечения диаметром 70 мм. Материал детали сталь 45.

Оборудование применяемое для исследования процесса нанесения покрытий из интерметаллидов - переоборудованный токарный станок с наплавочным аппаратом типа А-580, установленного на его суппорте (рис. 1).

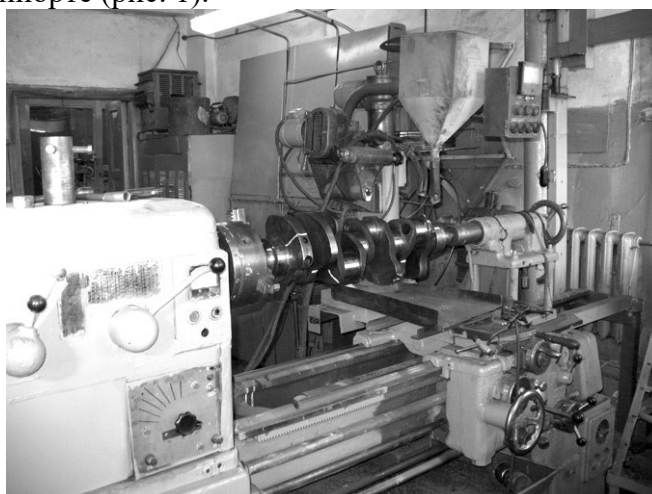


Рис.1. Общий вид переоборудованного токарного станка для наплавки шеек коленчатых валов

В конструкции наплавочного аппарата использована предложенная нами наплавочная головка с дополнительным подающим механизмом, позволяющим подавать заземленную присадочную проволоку в головную часть наплавочной ванны (рис. 2) с заданным расстоя-

нием относительно основного электрода (рис. 3), а так же с плавно изменяемой скоростью подачи присадочной проволоки.



Рис. 2. Общий вид наплавочной головки с дополнительным подающим механизмом



Рис. 3. Общий вид наплавочной головки с плавно изменяемым расстоянием относительно основного электрода

Для дальнейшего исследования обрабатываемости интерметаллидных покрытий резцами (рис. 4,5) использовался токарно-винторезный станок 16К20.



Рис. 4. Общий вид интерметаллидных покрытий до токарной обработки

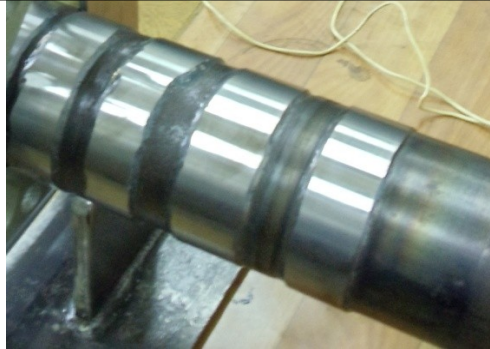


Рис. 5. Общий вид интерметаллидных покрытий после токарной обработки

Для исследования физических свойств поверхностного слоя использовались традиционные методы металлографических исследований с использованием микротвердомера ПМТ-3 (рис. 6), а для проведения экспериментальных исследований обработки для контроля параметра шероховатости используем профилограф-профиллометр мод. 201. (рис. 7).



Рис. 6 Микротвердомер ПМТ-3

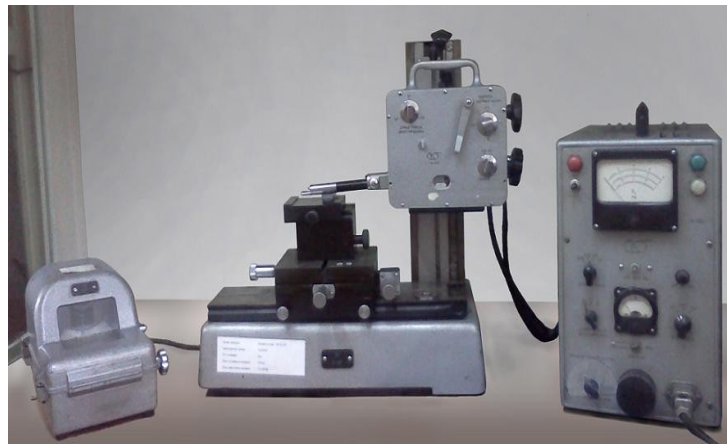


Рис. 7 Профилограф – профиллометр мод. 201

План эксперимента должен обеспечивать возможность варьирования каждого фактора не менее чем на трех уровнях. Следовательно, число опытов должно быть не менее числа коэффициентов, равного числу сочетаний $k + 2$, т.е.: $N \geq \binom{k+2}{2} = \frac{(k+2)(k+1)}{2}$, где k – число уровней варьирования факторов. При $k \leq 3$ наиболее эффективным является полный факторный эксперимент [3].

Таким образом, при 3-х уровнях варьирования 3-х факторов общее число независимых опытов составляет:

$$N = S^k,$$

где S – число независимых факторов.

Для удобства расчета коэффициентов модели в матрицу планирования вводили фиктивную независимую переменную X_0 , которая во всех опытах принимает значение +1.

С целью упрощения последующих расчетов и представления результатов эксперимента в компактном виде использовали матричную форму записи.

Матрица планирования полного факторного эксперимента 2^3 показана в табл. 1.

Таблица 1

ПОЛНЫЙ ПЛАН МАТРИЦЫ ПЛАНИРОВАНИЯ 2^3			
Номер точки	Значения факторов в кодовых обозначениях	Комбинации произведений факторов	Действительное значение показателя парамет-

плана	в кодовых обозначениях							ра оптимизации по реали- зации эксперимента				
	№	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	x ₁ x ₂ x ₃	Y ₁	Y ₂	Y
1	+	-	-	-	+	+	+	-	-	Y ₁	Y _{2,1}	Y ₁
2	+	+	-	-	-	-	+	+	+	Y ₂	Y _{2,2}	Y ₂
3	+	-	+	-	-	+	-	+	+	Y ₃	Y _{2,3}	Y ₃
4	+	+	+	-	+	-	-	-	-	Y ₄	Y _{2,4}	Y ₄
5	+	-	-	+	+	-	-	+	+	Y ₅	Y _{2,5}	Y ₅
6	+	+	-	+	-	+	-	-	-	Y ₆	Y _{2,6}	Y ₆
7	+	-	+	+	-	-	+	-	-	Y ₇	Y _{2,7}	Y ₇
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Y ₈	Y _{2,8}	Y ₈

Требуемое количество опытов в каждой точке плана определено по методике [1]. Трех повторных опытов достаточно для обеспечения 95% надежности результатов.

Последовательность выполнения опытов выбрана с применением таблицы равномерно распределенных случайных чисел [2].

Для описания функции отклика используем неполную квадратичную модель (линейная модель уравнения регрессии):

$$Y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3,$$

где Y – параметр оптимизации; b_i – параметры модели (коэффициенты регрессии); x_i – факторы процесса в кодированном виде.

Чтобы убедиться в воспроизводимости опытов, проводили параллельные опыты во всех областях изменения влияющих факторов. Каждый опыт повторяли трижды.

Среднее значение параметра оптимизации в опытах вычисляли по формуле:

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Y_{ji}$$

где k – число опытов (k=3).

Дисперсию опытов определяем по уравнению:

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (Y_{ji} - \bar{Y}_j)^2$$

Для проверки воспроизводимости опытов находили отношение наибольшей из оценок дисперсии к сумме всех оценок дисперсии:

$$G_p = \frac{S_{j\max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2},$$

где G_p – расчетное значение критерия Кохрена.

После сравнения расчетного и табличного значений критерия Кохрена, G_p ≤ G_T, устанавливали воспроизводимость опытов и оценивали однородность дисперсий.

Затем определяли оценку дисперсии воспроизводимости:

$$S(y)^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2.$$

Ошибку эксперимента находим из выражения:

$$S(y) = +\sqrt{S^2(y)}.$$

Коэффициенты в уравнении регрессии рассчитывались по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j,$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum X_{ji} y_j.$$

Коэффициенты полинома вычисляли с помощью программ Mathcad Prime 1.0 пакета MathSoftApps и представляли в виде матрицы.

Статистическую значимость коэффициентов проверяли с помощью t - критерия. Коэффициент регрессии значим, если выполняется условие:

$$b \geq S_b t,$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента.

Ошибки коэффициентов регрессии определялись по формуле:

$$S(b_i) = \frac{S(y)}{\sqrt{Nr}}$$

и сравнивали между собой.

Затем установили доверительный интервал длиной $2 \Delta b_i$:

$$\Delta b = t_{\kappa p} S(b_i).$$

Полученное уравнение регрессии проверялось на адекватность с помощью критерия Фишера, который представляет собой соотношение вида:

$$F_p = \frac{\max(S_{\epsilon/B}^2, S_{-}^2)}{\min(S_{\epsilon/B}^2, S_{-}^2)},$$

где S_{ad}^2 – оценка адекватности.

Оценку дисперсии адекватности вычисляем по формуле:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N - B} \sum (y_j^o - y_j^p)^2,$$

где N – число опытов полного факторного эксперимента; B – число коэффициентов регрессии искомого уравнения, включая свободный член; y_j^o, y_j^p – экспериментальное и расчетное значения функции отклика в j -м опыте;

Число степеней свободы для оценки дисперсии адекватности определяем по формуле:

$$f_{ад} = N - B,$$

уравнение регрессии адекватно при выполнении условия $F_p \leq F$,

где F – значение критерия Фишера.

После потенцирования уравнения и подстановки натуральных значений факторов получали математическую модель изучаемого процесса.

Данная модель аппроксимирует зависимость параметра оптимизации от выбранных факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. М.: Наука, 1978. 790 с.
2. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И.С. Солонин. М.: Машиностроение, 1972. 197 с.
3. Шаповалов В.В. Исследование динамических процессов трения методом многофакторного эксперимента / В.В. Шаповалов, А.И. Тетерин // Тр, РИИЖТ.1974. Вып. 103. С. 71-73.

Макеев Дмитрий Николаевич –
аспирант кафедры «Автомобили
и автомобильное хозяйство»
Саратовского государственного
технического университета

Makeev Dmitry –
Post-graduate Student of the Department
of «Automobiles and automobile economy»
of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.91.01

Д.В. Маношин, Т.Г. Насад

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ИЗНОСА
И ШЕРОХОВАТОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ
ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ СПЛАВОВ**

Приводятся экспериментальные данные обработки прецизионного сплава 36НХТЮ. Выведены зависимости износа инструмента и получаемой шероховатости от режимов резания для данного сплава.

Прецизионный сплав, износ, качество поверхности

D.V.Manoshin, T.G. Nasad

**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF DEPENDENCE OF DETERIORATION
AND ROUGHNESS FROM MODES OF PROCESSING FOR PRECISION ALLOYS**

Experimental data of processing a precision alloy 36НХТЮ are given. Dependences of wear of the tool and a received roughness on modes of cutting for this alloy are deduced.

Precision alloy, deterioration, quality of surface

Режущий инструмент является особым объектом технологии механической обработки. Разнообразные условия его эксплуатации вызывают множество видов повреждений и отказов технологической системы, а скорости изнашивания инструмента значительно выше, чем скорости изнашивания деталей и узлов станков. Поэтому работоспособность технологической системы в целом в первую очередь зависит именно от качества применяемого инструмента и правильного его использования. Роль режущего инструмента ещё больше возрастает на операциях механической обработки, характеризующихся повышенными тепловыми нагрузками, а именно: при высокоскоростном резании, обработке деталей из закаленных, коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов. Проблема износа режущего инструмента при обработке этих материалов остается актуальной и в наше время. Это объясняется тем, что машиностроительные заводы несмотря на более чем 40-летний опыт изготовления изделий из труднообрабатываемых материалов до сих пор испытывают значительные трудности при их обработке, а постоянное усложнение конструктивных форм деталей машин и повышение требования к качеству и точности обработки заставляет искать новые пути повышения стойкости режущего инструмента. К одному из основных технологических мероприятий, повышающих долговечность и надежность деталей машин, относится выбор и

назначение условий резания, обеспечивающих изготовление деталей заданной точности и стабильности как по размерам, так и по чистоте поверхности [2].

Поставленная задача заключалась в исследовании износа режущего инструмента и определение количественных характеристик шероховатости поверхности при токарной обработке прецизионного сплава 36НХТЮ. Для определения зависимостей был использован токарно-револьверный центр с ЧПУ Модель SL-20HE производства фирмы HAAS. В качестве экспериментального материала был использован круглый прокат из прецизионного сплава 36НХТЮ Ø40мм. Спектральный анализ на приборе «Niton XLt» показал следующий химический состав: Ni 35,63; Fe 46,17; Mn 1,07; Cn12,87; Ti 3,61 и подтвердил соответствие материала.[3] Для получения нужных физико-механических свойств заготовка подверглась термической обработке по технологическому процессу закалки заготовок и полос для чувствительных элементов деталей из сплавов 36НХТЮ; 36НХТЮ-Ш; 36НХТЮ5М. Замеры твердости образца показали 6НRC. В качестве режущего инструмента использовались твердосплавные пластины для обработки жаропрочных сплавов. Материал пластины был определен по спектральному анализу, и показал : WC 90,68±0,87; Co 5,71±0,29; Cu 0,53±0,15; Cr 0,64±0,29; Ti 1,2±0,57. На пластины было нанесено покрытие TiN толщиной 3 мкм.

Для определения общей зависимости шероховатости от скорости резания был проведен однофакторный эксперимент. В ходе опытов были получены результаты, которые показывают, что зависимость имеет два экстремальных значения при скорости резания V=50 и V=70м/мин. (рис.1).

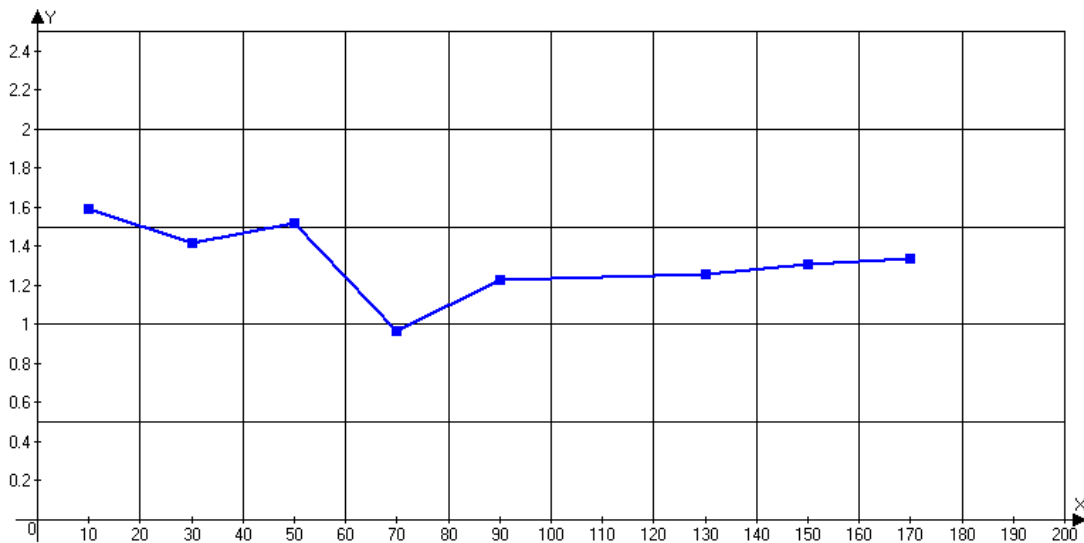


Рис.1. График зависимости шероховатости обрабатываемой поверхности от скорости резания, при однофакторном эксперименте

Анализ результатов показали, что в диапазоне скоростей резания от 30 до 50 м/мин. идет интенсивное наростообразование, поэтому чистота поверхности ухудшается. При скоростях от 50 до 70 м/мин. идет разупрочнение нароста и как следствие улучшение качества поверхности. Свыше 75 м/мин. идет постепенное увеличение шероховатости поверхности. Для дальнейшего подробного изучения были выбраны два участка, со скоростями резания от 70 до 170 м/мин. и от 50 до 70 м/мин. Экспериментальные исследования включали в себя проведение нескольких серий экспериментов по формуле ПФЭ³. Исходя из этих данных были получены две математические модели. Для черновой (1) и чистовой (2) обработки. Режимы обработки приведены в табл. №1.

Таблица 1

Вид обработки	Скорость резания, V м/мин.	Продольная подача, S мм/об.	Глубина резания, t мм.
---------------	----------------------------	-----------------------------	------------------------

	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
чистовое	70	170	0,04	0,17	0,15	1,2
черновое	50	70	0,17	0,55	1,2	5,5

$$Rz = 8669.619 \times V^{-1.356} \times t^{0.779} \times S^{0.729} \quad (1)$$

$$Ra = 23,33 \times V^{-0.499} \times t^{-0.066} \times S^{2.182-0.831 \lg V} \quad (2)$$

В ходе проведения эксперимента, шероховатость обработанной поверхности образца первоначально определялась на двойном микроскопе МИС-11, после чего, образец был измерен на портативном измерителе шероховатости Time TR 220. Потом на универсальном профилометре-профилографе модели 201 снята профилограмма поверхности образца (рис.2). На рис.3-4 показаны графические зависимости влияния шероховатости от глубины резания и подачи при черновом и чистовом точении.

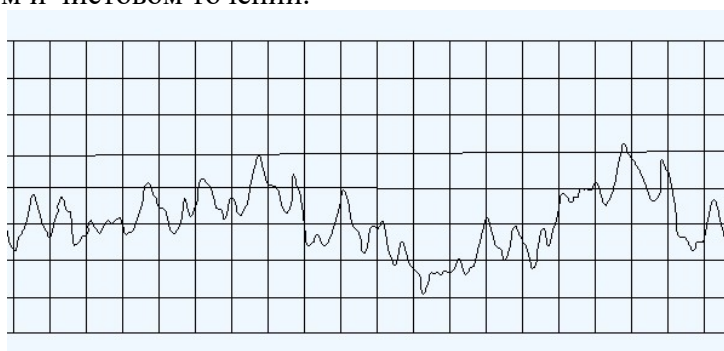


Рис.2. Профилограмма поверхности образца

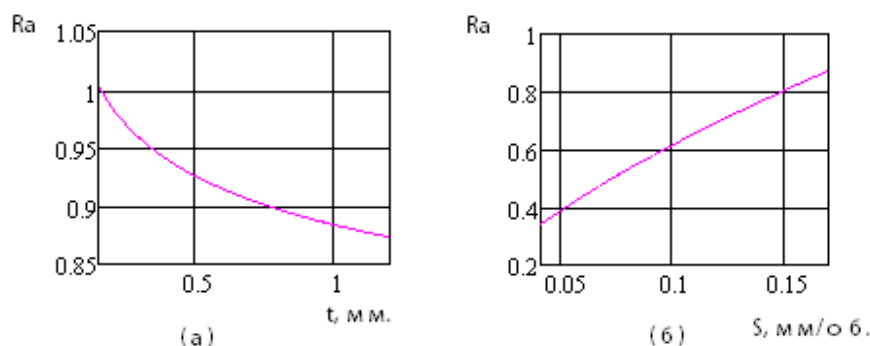


Рис.3. Зависимость шероховатости от глубины резания (а) и подачи (б) при чистовом точении

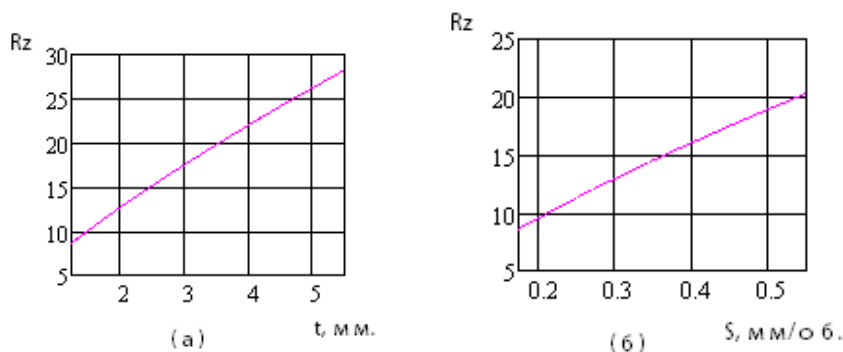


Рис.4. Зависимость шероховатости от глубины резания (а) и подачи (б) при черновом точении

Данные зависимости показали, что подача оказывает наибольшее влияние на получаемую поверхность. Имеет монотонную возрастающую зависимость. При чистовой обработке повышение подачи ограничивается шероховатостью обработанной поверхности.

Оптимальная скорость резания достигается в пределах $V=70-90$ м/мин. При скорости свыше 90м/мин. скорость резания влияет на высоту микронеровностей незначительно. Увеличение глубины резания более целесообразно, нежели подачи. Глубина резания при чистовой обработке оказывает слабое влияние на изменении высоты микронеровности. При черновой обработке с глубинами более 1,2 мм. влияние возрастает. При чистовом точении для достижения наименьшей высоты неровности целесообразно производить обработку при $t=0.5-1$ мм.

Экспериментальное изучение износа происходило при режимах приведенных в табл. №1. Исследования показали, что износ пластин происходит как по задней так и по передней (рис.5) поверхности инструмента. Изнашивание сопровождается образованием нароста (рис.6).

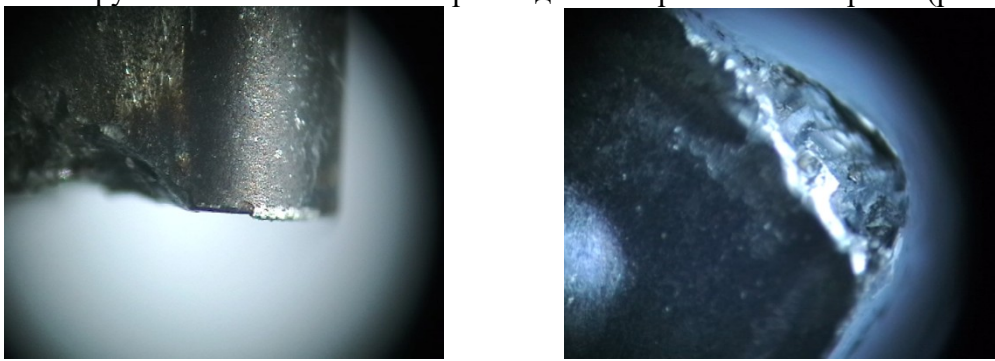


Рис.5. Износ задней (а) и передней (б) поверхности твердосплавной пластины

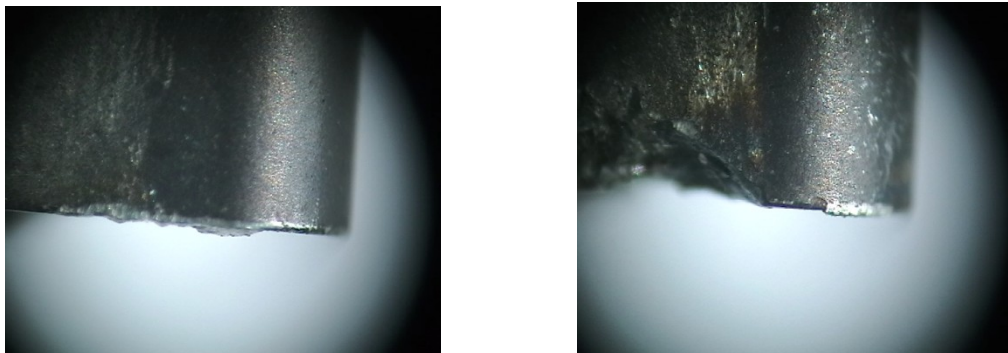


Рис.6. Фото износа задней поверхности черновых пластин. (TGT)

Обработка результатов измерения производилась по методике приведенной выше. Было получено 2 зависимости при черновой и (1) чистовой (2) обработке.

$$H_a = 1,99526 \times 10^{15} \times V^{-8.99} \times t^{-9.716} \times S^{15.02} \times t^{6.86 \lg V} \times S^{-7.99 \lg V} \times S^{2.216 \lg t} \quad (1)$$

$$H_a = 217270 \times V^{-3.067} \times t^{8.07} \times S^{0.165} \times t^{-3.647 \log v} \times S^{0.444 \log t} \quad (2)$$

На рис.7-8 показаны графические зависимости износа инструмента от режимов резания.

Полученные зависимости показали, что увеличение скорости резания положительно влияет на износ поверхности инструмента, как при чистовых, так и при черновых операциях. При увеличении глубины резания и подачи износ режущего инструмента увеличивается. Наибольшее влияние на износ инструмента при обработке прецизионных материалов в диапазоне скоростей оказывает подача. Износ инструмента зависит от конфигурации пластины и радиуса режущего клина. При увеличении радиуса износ происходит медленнее.

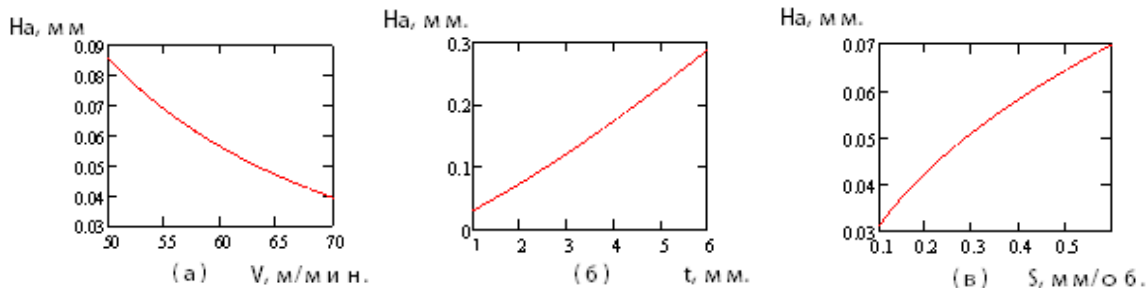


Рис.7. Зависимость износа инструмента от скорости резания, глубины и подачи при черновой обработке

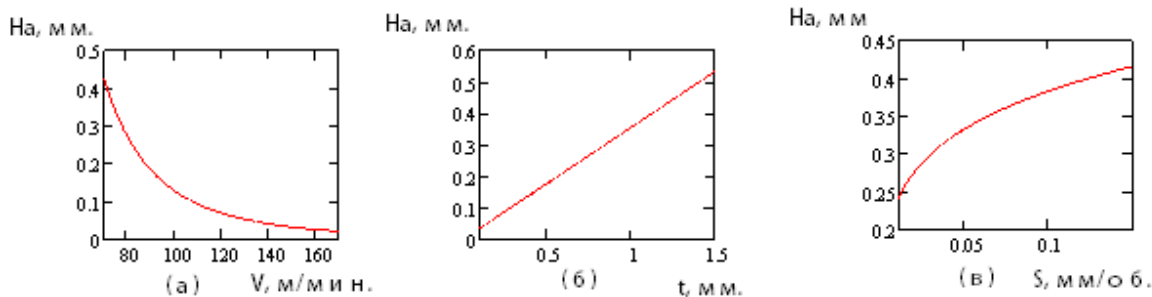


Рис.8. Зависимость износа инструмента от скорости резания, глубины и подачи при чистовой обработке

На основании проведенных многофакторных экспериментов получены зависимости износа инструмента и получаемой шероховатости от режимов резания, которые позволяют рассчитать оптимальные режимы обработки при черновых и чистовых операциях для прецизионного сплава 36НХТЮ. Также полученные модели позволяют прогнозировать процесс изнашивания инструмента в зависимости от свойств обрабатываемого материала и параметров резания, что позволяет сократить материальные затраты на используемый инструмент в 1,5-2 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев С.Н. Метод повышения стойкости режущего инструмента / С.Н. Григорьев. М.: Машиностроение, 2009. 368 с.
2. Бобров В.С. Основы теории резания металлов / В.С. Бобров. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
- 3.Туманов А.Т. Справочник по авиационным материалам / А.Т. Туманов. М.: Машиностроение, Т. 1, 1986. 512 с.

Маношин Дмитрий Валерьевич – аспирант кафедры «Технологии и оборудование электрохимических и электрофизических методов обработки материалов» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Manoshin Dmitriy Valerevich – post-graduate student of «Technologies and equipment for electrochemical and electrophysical methods of material processing» of Engels Technological Institute (branch) Saratov State Technical University

Насад Татьяна Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологии и оборудование электрохимических и электрофизических методов

Nasad Tatyana Gennadievna – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department «Technologies and equipment for electrochemical and electrophysical methods of material

обработки материалов» Энгельского
технологического института (филиала)
Саратовского государственного
технического университета

processing» of Engels Technological Institute
(branch) Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДУ 621.91.01

Д.В. Маношин, Т.Г. Насад

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩИХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВОВ

Статья посвящена исследованию методов повышения стойкости режущего инструмента из твердого сплава с покрытием. Приведен пример повышения производительности обработки и стойкости режущего инструмента за счет уменьшения растягивающих напряжений в поверхностном слое покрытия. Эффект достигается специальной отделкой поверхности режущего инструмента.

Повышение стойкости, покрытие, режущий инструмент

D.V. Manoshin, T.G. Nasad

METHOD FOR INCREASING THE RESISTANCE OF HARD RESCUSCHIN PLATES FOR PROCESSING HARD-ALLOYS

The paper is devoted to study a method of improving hard alloy with coated. It is an example of increasing performance of cutting tools by reducing the tensile stresses in the surface layer of the coating. This is achieved by special surface finish.

Increase in resistance, coated, cutting tools

Появление первых износостойких покрытий совершило революцию в металлообработке, даже довольно примитивное по сегодняшним меркам однослойное покрытие TiC, применявшееся на первых покрытых сменных неперетачиваемых пластинах, давало эффект в повышении производительности обработки примерно на 50%.

Но одновременно выявились существенные ограничения использования инструмента с покрытиями, появилась необходимость в серьезных исследованиях, как в области совершенствования технологии, так и в области разработки принципиально иных методов нанесения. Основным направлением совершенствования твердого сплава с покрытием была и остается борьба с хрупкостью его поверхностного слоя. Растягивающие напряжения в его поверхностном слое достигают опасной величины, чреватой зарождением трещин. Причиной образования трещин на поверхности покрытия является разница температурных коэффициентов линейного расширения основы и покрытия. При остывании, пластина сжимается меньше, чем покрытие, и соответственно покрытие покрывается сетью нанотрещин [1.]. В оставшихся целыми участках покрытия сохраняются остаточные растягивающие напряжения, а такие напряжения в поверхностном слое любого изделия, в том числе и твердосплав-

ной пластины – это потенциальная опасность появления новых трещин и усталостного разрушения при воздействии знакопеременных нагрузок.

Решением указанной проблемы является специальная отделка поверхности. Если известно, что растягивающие напряжения концентрируются в верхних слоях покрытия, то можно сделать его более толстым, а затем удалить эти слои одним из способов абразивной полировки. Вместе с удаленной с поверхности пластины частью слоя покрытия уходят до 80% остаточных напряжений.

В соответствии с разработанными технологическими принципами на твердосплавную подложку по стандартной технологии наносится покрытие типа TiCN-Al₂O₃-TiN, где каждый слой выполняет свою строго регламентированную функцию. Слой TiCN является прекрасной связкой и используется для повышения прочности адгезионной связи между инструментальным материалом и наружным слоем покрытия, а последующие слои усиливают защитные функции от различных факторов износа. Слой оксида алюминия (Al₂O₃), служит для защиты твердого сплава от воздействия высокой температуры и химических видов износа. Слой нитрида титана (TiN), обладает высокой твердостью, низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью.

После этого передняя поверхность пластины полируется по специальной технологии, в результате чего полностью снимается слой нитрида титана и верхняя часть слоя оксида алюминия. Экспериментально доказано, что удаление всего 2...3 микрона от общей толщины покрытия дает возможность снизить уровень внутренних растягивающих напряжений в 2 раза и ликвидировать большую часть зародышей трещин [2]. Кроме того, полировка открывает наиболее плотный и износостойкий слой оксида алюминия, который наилучшим образом сопротивляется диффузионному и абразивному износу, а также предохраняет основу пластины от воздействия тепла. Гладкая передняя поверхность дает дополнительные преимущества при обработке вязких материалов - на ней практически отсутствует схватывание с обрабатываемым материалом. Задняя поверхность, сохранившая всю толщину покрытия, эффективно сопротивляется действующим на нее нагрузкам связанным с трением.

Данная технология нанесения износостойкого покрытия позволила улучшить свойства твердого сплава сразу по всем направлениям. В сравнении с пластинами с обычным покрытием данные имеют:

- ✓ большую прочность;
- ✓ высокую стойкость к выкрашиванию режущей кромки, термическим трещинам и всем видам усталостного разрушения;
- ✓ лучшую стойкость к пластической деформации;
- ✓ более высокую износостойкость;
- ✓ более стабильную и предсказуемую работу в неблагоприятных условиях [1].

У пластин с пониженным уровнем внутренних напряжений в покрытиях процесс изнашивания имеет более равномерный характер, они показывают большую надежность, и тем самым достигается дополнительная экономия за счет сокращения непредвидимых простоев. Всё это значительно расширяет область применения, делая его практически универсальным, что позволяет обрабатывать как обычные стали, так и более сложные труднообрабатываемые материалы, а так же использовать их как при черновой, так и при чистовой обработке. Данные сплавы могут быть созданы для использования в широком диапазоне скоростей резания, при этом превышают показатели сплава со стандартным покрытием на 10% по скорости резания и до 30 % по уровню подачи.

На рис.1 представлены макрофотографии режущих кромок твердосплавной пластины после обработки 330 деталей с покрытием TiCN-Al₂O₃-TiN, нанесенным по традиционной технологии (а) и с полировкой по специальной технологии (б). Как видно, в последнем случае покрытие заметно снижает интенсивность изнашивания инструмента [1].

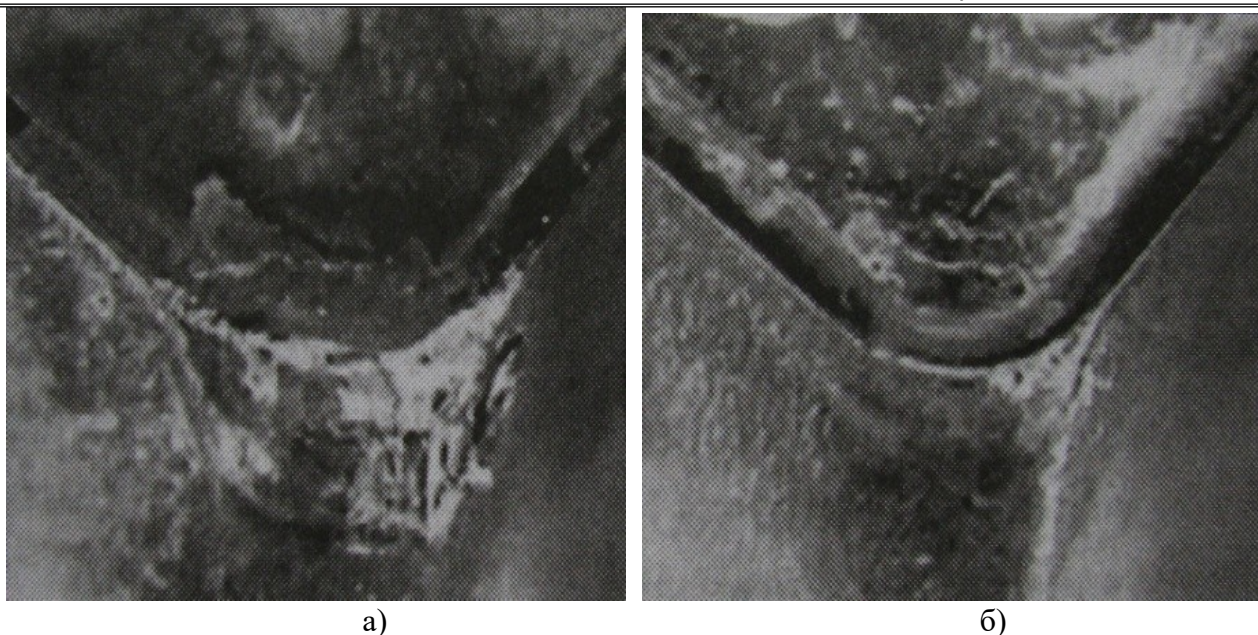


Рис.1. Твердосплавные пластины с покрытием $TiCN-Al_2O_3-TiN$ после продольного точения 330 деталей из конструкционной стали (HB 300) при $v=300$ м/мин, $s=0,4$ мм/об, $t=3$ мм: а- стандартное покрытие; б- покрытие после полировки

Результаты исследований показывают убедительное преимущество новой технологии обработки покрытия и подтверждают перспективность дальнейших исследований в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев С.Н. Метод повышения стойкости режущего инструмента / С.Н. Григорьев. М.: Машиностроение, 2009. 368 с.
2. Поляк М.С. Технология упрочнения: Технологические методы упрочнения / М.С. Поляк. М.: Машиностроение, Т.1, 1995. 685 с.

Маношин Дмитрий Валерьевич – аспирант кафедры «Технологии и оборудование электрохимических и электрофизических методов обработки материалов» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Manoshin Dmitriy Valerevich – post-graduate student of «Technologies and equipment for electrochemical and electrophysical methods of material processing» of Engels Technological Institute (branch) Saratov State Technical University

Насад Татьяна Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологии и оборудование электрохимических и электрофизических методов обработки материалов» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Nasad Tatyana Gennadievna – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department «Technologies and equipment for electrochemical and electrophysical methods of material processing» of Engels Technological Institute (branch) Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

Д.В. Маношин, Т.Г. Насад

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ НА ОКРУЖНУЮ СИЛУ P_z ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРЕЦИЗИОННОГО СПЛАВА 36НХТЮ

Рассматривается влияние режимов обработки на окружную силу резания P_z . В качестве экспериментального материала использован прецизионный сплав 36НХТЮ.

Сила резания, прецизионный сплав, подача, глубина резания

D.V.Manoshin, T.G. Nasad

INFLUENCE OF THE MODE OF CUTTING ON FORCE P_z AT PROCESSING OF THE PRECISION ALLOY 36НХТЮ

Influence of modes processing on force of cutting P_z is considered. The experimental material used in precision alloy 36НХТЮ.

Force of cutting, precision alloy

Быстрое развитие и совершенствование потребляющих отраслей промышленности приводит к усложнению и повышению требований, предъявляемых к материалам. Разрабатываются новые специальные стали и сплавы, обладающие специфическими физико-механическими свойствами. К таким сплавам относится прецизионный сплав 36НХТЮ. Применение данных сплавов разнообразно от упругих, чувствительных элементов приборов и деталей высокой точности, таких как мембрана, до сложных корпусных деталей. Особое внимание при обработке данных деталей уделяется точности и высокому качеству поверхности. Что сложно достичь при механической обработке из-за повышенной пластичности данных материалов и низкой теплопроводности. Эти факторы способствуют быстрому износу режущего инструмента, а это в свою очередь изменяет силы резания до 2-3 раз, шероховатость в пределах трех классов чистоты, и температуры резания на 200-300 °С. Также при износе инструмента существенно меняются показатели наклепа и остаточные напряжения в обработанных приповерхностных слоях, меняется характер стружкообразования. А возрастание сил резания существенно повышает энергозатраты, расходуемые на процесс резания, что существенно удорожает производство.

Поставленная задача заключалась в изучении влияния режимов обработки на окружную силу резания, создание её математической модели. Что даст возможность уменьшить силу резания P_z , при постоянной площади сечения срезаемого слоя.

Для этого была проведена серия экспериментов. Которая проводилась на токарно-револьверном центре с ЧПУ Модель SL-20HE. В качестве экспериментального материала был использован прецизионный сплав 36НХТЮ, твердостью 6 HRC. Который относится к сплавам с заданными свойствами упругости, обладающий высокими упругими свойствами в сочетании с другими специальными свойствами. (Повышенной коррозионной устойчивостью, повышенной прочностью, низкой магнитной проницаемостью, заданными значениями модуля нормальной упругости и температурным коэффициентом модуля упругости.) В качестве режущего инструмента использовались твердосплавные пластины для обработки жаропрочных сплавов. Материал пластины был определен по спектральному анализу на приборе «NITON XLt», который показал следующий состав : WC 90.68±0.87; Co 5,71±0,29; Cu 0.53±0.15; Cr 0.64±0.29; Ti 1.2±0.57.

Обработка производилась на режимах, приведенных в табл.1

Таблица 1

Режимы обработки сплава прецизионного сплава 36НХТЮ

№	Факторы	Минимальное значение	Максимальное значение
1	Скорость м/мин.	50	70
2	глубина резания мм.	1,2	5,5
3	подача мм/об.	0,17	0,55

Для изучения процесса были проведены две серии экспериментов: однофакторный, когда изменяется только тот фактор процесса резания, влияние которого изучают и многофакторный при котором на процесс влияет сразу несколько факторов. На основании проведенных экспериментов были выявлены следующие зависимости: (1) – полученная при однофакторном эксперименте, (2) – при многофакторном.

$$\begin{aligned}
 P_z(V) &= 824.1 \times V^{-0.0685} \\
 P_z(t) &= 538.27 \times t^{0.876} \\
 P_z(S) &= 1713.9 \times S^{0.56} \\
 P_z &= K \times V^{-0.175} \times t^{0.7} \times S^{0.459}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\tag{2}$$

где V – скорость резания при черновой обработке; t – глубина резания; S – подача.

$K=10^{3,426}$ – коэффициент полученный для материала 36НХТЮ.

Данная зависимость показала, что при увеличении глубины резания и подачи сила резания возрастает. Но влияние t и s на силу резания P_z при постоянной площади сечения срезаемого слоя $t \times s$, при разных отношениях t/s будет неодинакова. Поэтому при точении для того чтобы при заданной площади сечения максимально уменьшить величину сил, необходимо уменьшить глубину резания и увеличить подачу. Т.е стремиться работать с возможно меньшим отношением t/s. Это объясняется тем что, глубина резания и подача оказывает разное влияние на степень деформации срезаемого слоя.

На рис. 1 графически показано влияние скорости резания на окружную силу при черновой обработки со следующими режимами: $S=0.17$ мм/об, $t=1.2$ мм. При однофакторном и многофакторном исследовании. На рис 2 приведены зависимости влияния глубины резания и подачи на окружную силу.

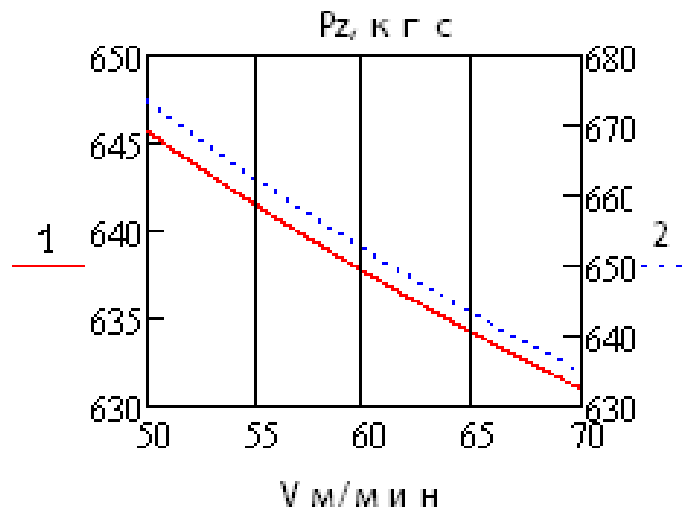


Рис. 1. График зависимости силы резания от скорости резания

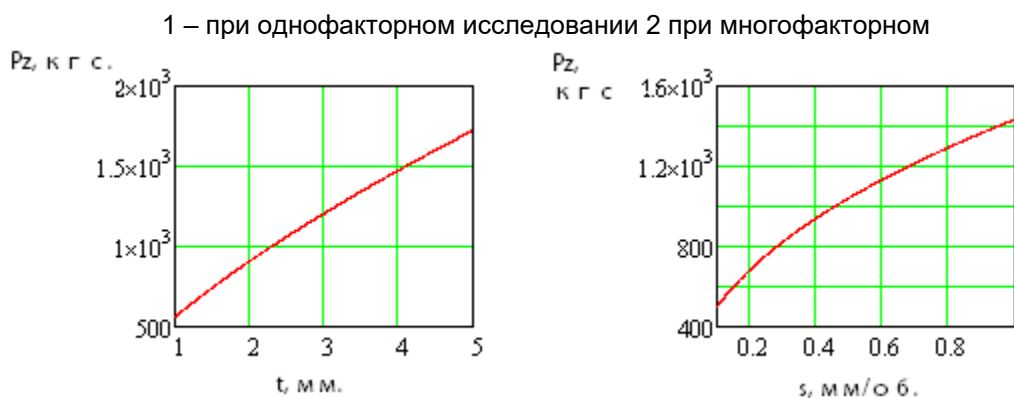


Рис. 2. График зависимости силы резания от глубины резания (а) и подачи (б) при черновой обработке со следующими режимами: $S=0.17$ мм/об, $t=1.2$ мм

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров В.С. Основы теории резания металлов / В.С. Бобров. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
2. Туманов А.Т. Справочник по авиационным материалам / А.Т.Туманов. М.: Машиностроение, Т. 1, 1986. 512 с.

Маношин Дмитрий Валерьевич – аспирант кафедры «Технологии и оборудование электрохимических и электрофизических методов обработки материалов» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Manoshin Dmitriy Valerevich – post-graduate student of «Technologies and equipment for electrochemical and electrophysical methods of material processing» of Engels Technological Institute (branch) Saratov State Technical University

Насад Татьяна Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологии и оборудование электрохимических и электрофизических методов обработки материалов» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

Nasad Tatyana Gennadievna – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department «Technologies and equipment for electrochemical and electrophysical methods of material processing» of Engels Technological Institute (branch) Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.643.3

Ю.А. Мефедова

РАСЧЕТ РУКАВОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ НАГРУЗКИ МЕЖДУ СЛОЯМИ ОПЛЕТКИ

Описывается методика расчета рукавов высокого давления с металлической оплеткой по распределению нагрузки между слоями каркаса. По-

лучены выражения для расчета геометрии каркаса рукава и разрывного давления в зависимости от количества оплеток.

Рукав высокого давления, металлическая оплетка, разрывное давление, слои оплетки, распределение давления

J.A.Mefedova

CALCULATION OF HOSES OF HIGH PRESSURE FOR LOAD DISTRIBUTION BETWEEN BRAIDING LAYERS

The design procedure of hoses of high pressure with a metal braiding on load distribution between frame layers is described. Expressions for calculation of geometry of a frame of a hose and crack open pressure depending on quantity of braiding are received.

Hose of high pressure, metal braiding, crack open pressure, braiding layers, pressure distribution

Рукава высокого давления (РВД) служат для передачи жидкостей (воды, эмульсий, масел, смазок и др.) и рабочего усилия посредством жидкости (например, в гидравлических конструкциях). Технически, РВД представляют собой многослойную конструкцию из двух и более коаксиальных резиновых шлангов, которые вставляются друг в друга. Усиление конструкции достигается путем армированием с помощью металлических оплеток или навивок. При чем оплеточная конструкция более распространена, так как у них больший радиус изгиба, чем у сопоставимых рукавов навивочной конструкции.

Высокая механическая прочность в сочетании с гибкостью позволяет использовать РВД там, где невозможно использование труб. Особое признание РВД нашли в различном гидравлическом оборудовании, дорожной, грузовой и подъемно-транспортной технике, строительной и сельскохозяйственной спецтехнике, а также в станках и некоторых видах лабораторного оборудования.

Основным критерием прочности рукава высокого давления является металлическая оплетка и количество ее слоев, при чем существует значительное различие в нагрузках, воспринимаемы от первой оплетки к последней. Поэтому актуальным вопросом является разработка и исследование модели, учитывающей распределение нагрузки между слоями каркаса.

Распределение нагрузок в каркасе рукава, имеющего i однородных оплеток можно рассматривать в следующем виде:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_i, \quad (1)$$

где $p_1, p_2, p_3, \dots, p_i$ – доли гидравлического давления p , воспринимаемые соответствующими оплетками.

Уравнение совместимости деформаций и перемещений оплеток в рукаве, например, с двумя металлическими оплетками (рис. 1) при этом будет иметь вид:

$$pd_1^2 = p_{1-2}(d_2^2 + 2d_1^2), \quad (2)$$

где d_1 и d_2 – средние расчетные диаметры наложения первой и второй оплетки; p_{1-2} – промежуточное давление между первой и второй оплетками.

Давление на первую (внутреннюю) оплетку:

$$p_1 = p - p_{1-2}, \quad (3)$$

а давление на вторую (внешнюю) оплетку:

$$p_2 = p_{1-2}. \quad (4)$$

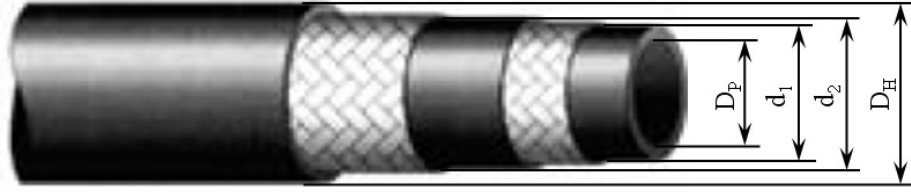


Рис. 1. Рукав с двумя металлическими оплетками

С учетом уравнения совместимости деформаций и перемещений (2):

$$p_1 = p \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2 + 2d_1^2} \right); \quad (5)$$

$$p_2 = \frac{pd_1^2}{d_2^2 + 2d_1^2}. \quad (6)$$

Для однооплеточного рукава давление на оплетку рассчитывается по формуле [2]:

$$p_1 = 0,735 \cdot k_B \cdot N \cdot n \cdot \frac{1}{d_1^2}, \quad (7)$$

где k_B – прочность оплетки разрыву, Н/нить; N – количество потоков проволоки, выкладываемой шпулей оплеточной машины; n – число проволок на шпуле.

Данное выражение (7) применимо и для первой оплетки двухоплеточного рукава.

Выразим давление на второй оплетке через давление на первой оплетке:

$$p_2 = \frac{p_1}{\left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2 + 2d_1^2} \right)} \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2 + 2d_1^2} = p_1 \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2 + d_1^2}. \quad (8)$$

Тогда давление на второй оплетке:

$$p_2 = 0,735 \cdot k_B \cdot N \cdot n \cdot \frac{1}{d_2^2 + d_1^2}. \quad (9)$$

Расчетное уравнение для давления разрыва с учетом (1) принимает вид:

$$p_B = 0,735 \cdot k_B \cdot N \cdot n \cdot \left(\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2 + d_1^2} \right) \cdot \frac{C_1}{C_2}, \quad (10)$$

где C_1 и C_2 – поправочные множители.

Множитель C_1 учитывает неодновременность разрыва параллельно идущих проволок в потоке:

$$C_1 = 1 - 0,015(n - 1). \quad (11)$$

Множитель C_2 учитывает удлинение ε материала проволоки в оплетке:

$$C_2 = 1 + \frac{\varepsilon}{l}. \quad (12)$$

Соответственно для рукава с тремя металлическими оплетками может быть получено выражение вида:

$$p_B = 0,735 \cdot k_B \cdot N \cdot n \cdot \left(\frac{1}{d_1^2} + \frac{2d_2^2 + d_3^2}{d_1^2(d_2^2 + d_3^2)} + \frac{1}{d_2^2(d_1^2 + d_3^2)} \right) \cdot \frac{C_1}{C_2}. \quad (13)$$

Для использования формул (7), (10), (13) необходимо рассчитать средние расчетные диаметры наложения оплеток. Расчетный диаметр наложения первой оплетки:

$$d_1 = D_p + 2(\delta_{PK} - q \cdot d_{ПР}), \quad (14)$$

где $q \cdot d_{ПР}$ – глубина погружения оплетки в толщу заготовки резиновой камеры ($q \approx 0,5$); δ_{PK} – толщина внутренней резиновой камеры (согласно ГОСТ 6286-73 минимальная толщина для

рукавов диаметров до 16 мм включительно эта величина составляет не менее 1,5 мм; для диаметров от 16 до 20 мм – 2,0 мм; для рукавов более 20 мм – 2,2 мм);

Наружный диаметр по внутренней оплетке:

$$d_{H1} = d_1 + 2 \cdot d_{\text{ПР}}. \quad (15)$$

Расчетный диаметр наложения второй оплетки:

$$d_2 = d_{H1} + 2(\delta_{\text{РП}} - q \cdot d_{\text{ПР}}), \quad (16)$$

где $\delta_{\text{РП}}$ – толщина резиновой прослойки между оплетками (примем $\delta_{\text{РП}}=1,5$ мм).

Наружный диаметр по внешней оплетке:

$$d_{H2} = d_2 + 2 \cdot d_{\text{ПР}}. \quad (17)$$

Аналогично можно рассчитать диаметры наложения последующих оплеток.

Если знать толщину внешнего резинового слоя $\delta_{\text{ВР}}$, защищающий рукав от воздействий внешней среды, то может быть рассчитан наружный диаметр рукава:

$$D_H = d_{H2} + 2 \cdot \delta_{\text{ВР}}. \quad (18)$$

Согласно данной методике рассчитаем разрывное давление p_B для ряда рукавов (табл.1) при заданной прочности k_B в зависимости от количества слоев оплетки.

Таблица 1

Параметры двухоплеточного рукава группы А согласно ГОСТ 6286-73 [1]

Параметр	Обоз.	1	2	3
Внутренний диаметр рукава, мм	D_p	12±0,3	16±0,5	25±0,5
Наружный диаметр рукава, мм	D_H	24,6±1,0	27,8±1,0	39,7±1,0
Наружный диаметр по верхней оплетке, мм	d_{H2}	19,9±1,0	23±1,0	34,5±1,0
Рабочее давление, МПа	P_p	21	16,5	12,5
Диаметр проволоки, мм	$d_{\text{ПР}}$	0,3±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01
Усилие разрыва проволоки, кг	K	15,5-17,8	15,5-17,8	15,5-17,8

Рукава должны быть герметичными при испытании статическим гидравлическим давлением $2P_p$ и иметь не менее чем трехкратный запас прочности $3P_p$.

Прочность оплетки разрыву k_B может быть оценена через усилие разрыва проволоки:

$$k_B = K \cdot g \approx 9,8 \cdot K. \quad (19)$$

Удлинение материала проволоки для низкоуглеродистой проволоки с покрытием согласно ГОСТ 3282-74 примем 12%.

По выражениям (14)-(18) рассчитаем внутреннюю геометрию рукавов (табл.2).

Таблица 2

Расчет геометрии рукавов высокого давления

Параметр	Обоз.	1	2	3
Внутренний диаметр рукава, мм	D_p	12	16	25
Толщина внутренней резиновой камеры, мм	$\delta_{\text{РК}}$	2	2	2,5
Диаметр наложения первой оплетки, мм	d_1	15,7	19,7	29,7
Наружный диаметр по внутренней оплетке, мм	d_{H1}	16,3	20,3	30,3
Толщина резиновой прослойки между оплетками, мм	$\delta_{\text{РП}}$	1,5	1,5	1,5
Диаметр наложения второй оплетки, мм	d_2	19	23	33
Наружный диаметр (расчетный) по внешней оплетке, мм	d_{H2}	19,6	23,6	33,6
Наружный диаметр (по ГОСТ) по внешней оплетке, мм	d_{H2}^*	19,9±1,0	23±1,0	34,5±1,0
Толщина внешнего резинового слоя, мм	$\delta_{\text{ВР}}$	2,5	2,5	2,5
Наружный (расчетный) диаметр рукава, мм	D_H	24,6	28,6	38,6
Наружный диаметр (по ГОСТ) рукава, мм	D_H^*	24,6±1,0	27,8±1,0	39,7±1,0

Количество потоков проволоки N , выкладываемой шпулей оплеточной машины и число проволок на шпуле n для каждого диаметра рукава могут быть в различных комбинациях (табл.3).

Таблица 3

Соответствие количества потоков и числа нитей в зависимости от диаметра рукава

Диаметр рукава, мм	Количество потоков N	24	36	48	64	96
$D_p=6$	Число проволок n	3	-	-	-	-
$D_p=8$	Число проволок n	4	-	-	-	-
$D_p=12$	Число проволок n	6	4	3	-	-
$D_p=16$	Число проволок n	8	5	4	3	-
$D_p=20$	Число проволок n	10	6	5	3	-
$D_p=25$	Число проволок n	12	8	6	4	3
$D_p=32$	Число проволок n	15	10	7	5	3

Согласно описанной выше методике построена зависимость разрывного давления от диаметра рукава и количества оплеток (рис.2). С увеличением диаметра рукава разрывное давление уменьшается, а с увеличением числа оплеток – возрастает.

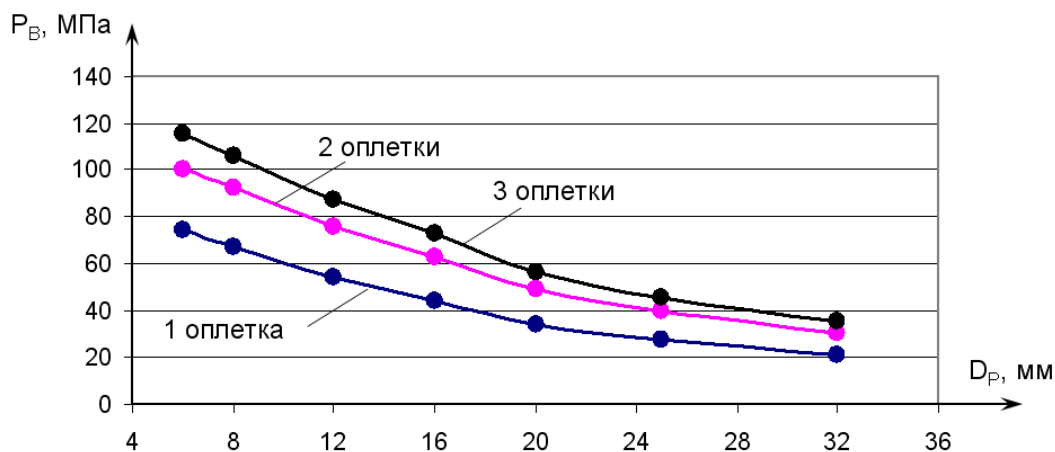


Рис.2. Зависимость разрывного давления от диаметра рукава и количества оплеток

На рис.3 представлено распределение нагрузок в каркасе рукава в зависимости от количества оплеток на примере рукава диаметром 12 мм. Каждая последующая оплетка воспринимает меньшую нагрузку, чем предыдущая. Если выразить в процентном соотношении, то приняв нагрузку на первую внутреннюю оплетку за $\eta_1=100\%$, нагрузка на последующие оплетки $\eta_2=40,6\%$, $\eta_3=15,66\%$.

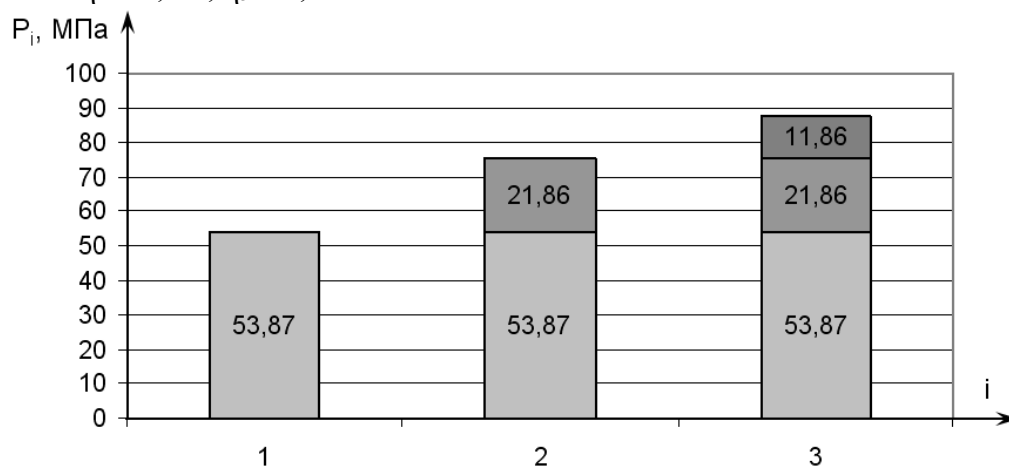


Рис.3. Распределение нагрузок в каркасе рукава ($D_p = 12$ мм) в зависимости от количества оплеток

Если условно предположить, что в «тонкослойных» рукавах величины диаметров наложения оплеток близки между собой ($d_1=d_2=...=d_i$), то расчетные уравнения (7), (10), (13) могут принять следующий упрощенный вид:

$$p_B = 0,735 \cdot k_B \cdot N \cdot n \cdot \sum_{s=1}^i \frac{1}{2^{s-1} d_1^2} \cdot \frac{C_1}{C_2}. \quad (20)$$

В этом случае разрывное давление для рукавов с оплетками больше одной увеличится по сравнению с соответствующими рукавами, имеющими между оплетками промежуточный «толстый» резиновый слой. На рис.4 представлено сравнение распределение давления в рукавах рассчитанной геометрии и «тонкослойных» рукавах, на примере рукава с $D_p = 12$ мм.

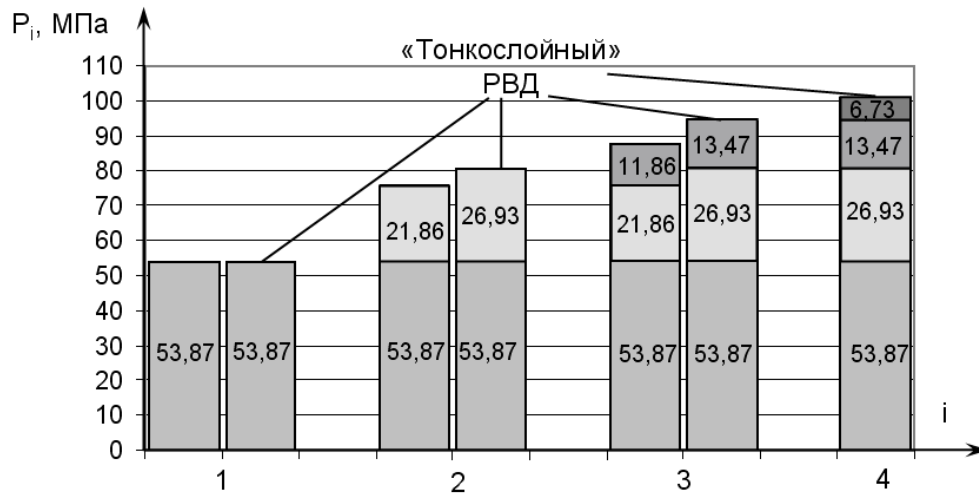


Рис.4. Сравнение распределения нагрузок в каркасе рукава

Выражая в процентном соотношении, вторая оплетка воспринимает $\eta_2^* = 49,9\%$ от нагрузки первой, третья – $\eta_3^* = 25\%$, четвертая – $\eta_4^* = 12,5\%$, пятая – $\eta_5^* = 6,3\%$, шестая – $\eta_6^* = 3,1\%$. Поэтому увеличение количества оплеток до большого числа нерационально.

На основании проведенного расчета можно сделать следующие выводы. Доли гидравлического давления, воспринимаемые металлическими оплетками рукава, уменьшаются в описанных выше процентных соотношениях, начиная от первой (внутренней) к последующими. Увеличение числа оплеток ведет к увеличению жесткости конструкции рукава, что снижает радиус изгиба, а разрывное давление при этом возрастает незначительно. Поэтому для увеличения разрывного давления РВД можно уменьшать толщину резиновой прослойки между оплетками или использовать проволоку с большим усилием разрыва.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ-6286-73. Рукава резиновые высокого давления с металлической оплеткой неармированные. Технические условия. Введ. 1974-07-01. М. Изд-во стандартов, переизд. 2003. 16 с.
2. Лепетов В.А. Расчеты и конструирование резиновых технических изделий и форм / В.А. Лепетов. Л.: Химия, Ленингр. отделение, 1972. 312 с.

Мефедова Юлия Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и информатика в технических системах» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал) Саратовского государственного технического университета

Mefedova Julia Aleksandrovna – Candidate of Technical Sciences, the associate professor «Control and informatics in technical system» Balakovsky institute of technique, technology and controls (branch) of the Saratov state technical university

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарёв, Л.Г. Бокова

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ
С УЧЁТОМ ПОКАЗАТЕЛЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ В СИСТЕМЕ ПЛАНИРОВАНИЯ
МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

В статье рассматриваются вопросы автоматизации разработки технологических операций в условиях многономенклатурного производства. Приводится методика оценки производственной технологичности с учётом особенностей многономенклатурного производства.

Автоматизация проектирования технологических операций, система планирования технологических процессов, многономенклатурное производство, технологичность

S.G. Mitin, P.Yu. Bochkarev, L.G. Bokova

**DESIGN OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS
CONSIDERING OF MANUFACTURABILITY IN MULTINOMENCLATURE
PROCESSES PLANNING SYSTEM**

Questions of automation design of technological operations in the conditions of multinomenclature manufacturing are considered in the article. The technique of an evaluating manufacturability according the features of multinomenclature production is described.

Automation of designing of technological operations, CAPP, multinomenclature manufacturing , manufacturability

Современное машиностроение характеризуется стремлением к модернизации существующих и созданию новых производственных систем по изготовлению широкой номенклатуры изготавливаемых изделий на современном высокопроизводительном оборудовании. Эти моменты ставят задачу обеспечения технологической гибкости машиностроительных предприятий с позиции быстрого реагирования на изменяющиеся условия производства. На первый план выходят задачи автоматизации проектирования на всех уровнях технической подготовки производства: от оценки технологичности изделий до создания технологической документации на механическую обработку в автоматическом режиме.

Существующие системы автоматизированного проектирования позволяют сократить время разработки технологических процессов, однако проектирование ведётся отдельно для каждой детали либо группы деталей, объединённых по конструктивным или технологическим признакам, при этом не учитывается состояние производственной системы в процессе реализации разработанных технологических процессов. В связи с этим назрела необходимость создания новых методов проектирования технологических процессов на основе полной формализации всех проектных процедур с целью надления автоматизированных систем технологической подготовки производства возможностью быстрого реагирования на изменение производственной ситуации и учёта особенностей каждой производственной системы.

В наибольшей степени поставленные выше задачи находят своё решение в автоматизированной системе планирования многономенклатурных технологических процессов [1], основными принципами создания которой являются полная формализация всех проектных

процедур, параллельное проектирование технологических процессов для всех запланированных для обработки деталей с учётом реально складывающейся производственной ситуации, многовариантные решения задач проектирования.

Автоматизированная система планирования многономенклатурных технологических процессов представляет собой многоуровневую иерархическую систему и состоит из двух страт: страты проектирования технологических процессов и страты их реализации (рис.1). На страте проектирования создаются технологические процессы, которые обеспечивают возможность изготовления всей номенклатуры деталей в конкретной производственной системе. На страте реализации технологических процессов определяются показатели эффективности реализации технологических процессов и эффективности работы производственной системы, которые наряду с информацией об изменении производственных условий поступают в виде обратной связи на страту проектирования.

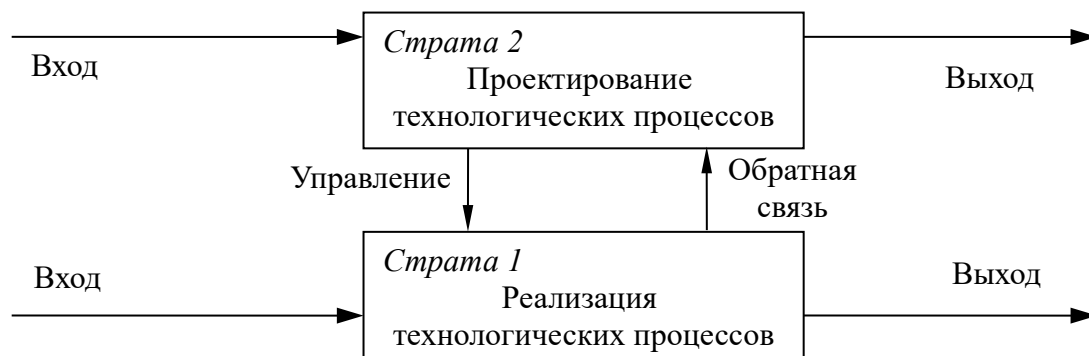


Рис. 1. Стратифицированное представление системы планирования технологических процессов

В системе планирования многономенклатурных технологических процессов предложена общая последовательность проектирования технологических процессов на уровне технологических операций, которая включает в себя необходимость разработки структуры операции, определение средств технологического оснащения, расчёт параметров обработки. Однако состав и последовательность проектных действий имеют существенные различия в зависимости от групп технологического оборудования и применяемой технологической оснастки. Применение принципов системного подхода позволяет разделить задачу проектирования технологических процессов на уровне технологических операций путём разработки ряда проектных процедур для каждой группы оборудования. В результате появляется возможность создавать технологические процессы с учётом конструктивно-технологических особенностей всей номенклатуры изделий, при этом подсистема проектирования технологических операций автоматически определяет набор проектных процедур, необходимый на каждом этапе проектирования.

Исходными данными для разработки технологических операций служат информация об обрабатываемых деталях, информация о принятых на предыдущих этапах технологических решениях, информация о технологических возможностях оборудования и средствах технологического оснащения (СТО), нормативно-справочная информация, которая хранится в соответствующих базах данных (БД). Информация о принятых на предыдущих этапах технологических решениях представляет собой кортежи переходов, которые были получены на стадии разработки маршрутов технологических процессов.

Выходными данными является множество вариантов технологических операций, которое сохраняется в соответствующей базе данных, а также комплект технологической документации, который поступает в качестве управляющего алгоритма на вход подсистемы реализации технологических процессов.

В роли внешнего возмущающего воздействия выступает информация о текущем состоянии производственной системы, благодаря чему существует возможность оперативно

реагировать на изменение производственных условий путём выбора альтернативных вариантов реализации технологических операций из ранее сформированного множества.

Во время проектирования технологических операций возникает необходимость в решении многовариантных задач разработки содержания и состава операций, выбора технологической оснастки из достаточно широкой номенклатуры режущего и вспомогательного инструмента, расчёта и оптимизации режимов резания. В связи с этим каждый этап целесообразно разделить на три части: генерация возможных вариантов, отсев нерациональных вариантов, выбор рациональных вариантов в соответствии со сложившейся производственной ситуацией.

Для каждого этапа разрабатываются формализованные методики проектирования с применением соответствующего математического аппарата. Рассмотрим в качестве примера разработку формализованных методик проектирования операций, выполняемых на оборудовании фрезерной группы.

На этапе формирования комплектов технологической оснастки для оборудования фрезерной группы применяется аппарат теории множеств для генерации возможных вариантов режущего и вспомогательного инструмента.

Наиболее эффективным для решения задачи отсева нерациональных вариантов оснастки видится применение критерия однородности технологической оснастки, который обеспечивает инвариантность структур операций и позволяет выполнить требование взаимозаменяемости элементов технологических операций. Формализацию этой проектной процедуры производится с использованием элементов линейной алгебры, алгебры Буля и теории множеств.

Формирование рационального комплекта технологической оснастки для оборудования фрезерной группы может быть осуществлено путём перебора различных комбинаций режущего и вспомогательного инструмента для всей совокупности технологических переходов. В связи с тем, что таких вариантов может быть достаточно много, и для их перебора потребуются слишком большие вычислительные ресурсы, используется математический аппарат динамического программирования, преимущество которого заключается в отсутствии необходимости расчёта параметров оптимизации для каждого сочетания вариантов технологической оснастки. Кроме того, применение динамического программирования позволит оптимизировать систему в целом и избежать случаев, когда оптимизация отдельных элементов приведёт к неработоспособности системы.

При наличии рациональных комплектов технологической оснастки появляется возможность перейти к проектной процедуре формирования структуры технологической операции фрезерной обработки. 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 ведущим фактором, определяющим возможность повышения показателя технико-экономической эффективности технологических процессов.

На этапе разработки структур технологических операций ключевым моментом является выбор рациональной последовательности технологических переходов. Методика генерации возможных последовательностей обработки построена с применением математического аппарата теории графов. При решении задачи формируется полный ориентированный граф G . Каждой вершине графа присваивается код элементарной обрабатываемой поверхности. Каждая дуга отражает последовательность обработки соответствующих типов элементарных поверхностей. Для определения возможной последовательности обработки i -го кортежа, состоящего из m переходов, из графа G выбирается подграф, вершины которого соответству-

ют обрабатываемым поверхностям в кортеже. Затем формируются возможные варианты последовательностей переходов путём обхода вершин по стрелке с соблюдением следующих условий: каждая вершина должна включаться в маршрут столько раз, сколько раз встречается в кортеже технологических переходов элементарная поверхность, соответствующая данной вершине; для каждой вершины, начиная со второй, не должно быть исходящей дуги в направлении каждой из предыдущих вершин, либо между этими вершинами должны быть противоположно ориентированные дуги.

Отсев нерациональных вариантов последовательностей обработки на оборудовании фрезерной группы производится по степени точности обработки и по относительному расположению обрабатываемых поверхностей. Выбор рациональных вариантов последовательностей обработки осуществляется по критерию минимизации штучно-калькуляционного времени операции.

Расчёт параметров обработки и нормирование технологических операций имеет смысл производить по известным аналитическим зависимостям для каждого варианта технологической операции. По результатам расчётов появляется возможность выбора вариантов операций с минимальным штучно-калькуляционным временем, для которых генерируется технологическая документация, поступающая в качестве управляющего алгоритма в подсистему реализации технологических процессов.

Таким образом, к настоящему времени созданы модели и разработаны подсистемы, позволяющие 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.

Понятие технологичности конструкции предусматривает такое проектирование, которое при соблюдении всех технических требований обеспечивает минимальную трудоемкость изготовления, минимальные материалоемкость и себестоимость, а также возможность быстрого освоения выпуска изделий в условиях многономенклатурного производства на базе применения современного высокопроизводительного оборудования, методов обработки и автоматизации технологической подготовки производства.

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. При создании системы планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки, в основу которой положена многовариантность реализации технологических процессов с учетом реально складывающейся производственной ситуации, оценка деталей на технологичность должна учитывать следующие дополнительные факторы:

технологичность детали зависит от реальных технологических возможностей оборудования в рамках рассматриваемой производственной системы;

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 рамках одной производственной системы.

Учет представленных факторов предлагается вести посредством разработки следующих моделей и методик, реализация которых в системе планирования технологических процессов механообработки в виде самостоятельных проектных процедур предусматривается в приведенной ниже последовательности.

1. Проверка конструктивных характеристик деталей на возможность их изготовления в рамках конкретной производственной системы с учетом технологических возможностей механообрабатывающего оборудования.

2. Определение уровня использования технического потенциала оборудования при изготовлении отдельных деталей и всей запланированной номенклатуры деталей.

3. Оценка комплекта изготавливаемых деталей по показателю однородности по виду и конструктивным характеристикам поверхностей, как составляющих элементов деталей, и заключение о степени их унификации.

4. Прогнозирование технико-экономических показателей изготовления запланированной номенклатуры деталей с целью выработки предложений по формированию рационального комплекта деталей для конкретно сформировавшихся реальных производственных условий.

Вычислительные процедуры оценки показателя технологичности разделены по функциональным задачам на две группы. В задачу первых входит отсеивание 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.

Выполненный анализ по представленным процедурам позволит на этапе формирования комплекта обрабатываемых деталей дать оценку их технологичности с точки зрения соответствия тем основным принципам, которые заложены при разработке системы планирования многономенклатурных технологических процессов.

Таким образом, одной из особенностей разработки технологических операций в условиях многономенклатурного производства является необходимость постоянного учёта производственной ситуации как на момент проектирования так и во время реализации технологических процессов. Оценка показателя технологичности изделий на ранней стадии проектирования позволит сформировать рациональные комплекты деталей, изготовление которых возможно в данной производственной системе, а созданные формализованные методики проектирования технологических операций для различных групп оборудования дают возможность быстро адаптироваться к изменяющимся производственным условиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарёв П. Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарёв // Технология машиностроения. 2002. №1. С. 10-14.

2. Митин С.Г. Формирование методического обеспечения автоматизированной подсистемы проектирования операций фрезерной обработки / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарёв // Научные технологии в машиностроении. 2012. №1. С. 32-39.

3. Бокова Л.Г. Структура оценки производственной технологичности деталей в многономенклатурных механообрабатывающих системах / Л.Г. Бокова // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. №56. С. 27-31.

<p>Митин Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета</p>	<p>Mitin Sergei Gennadyevich – Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of «Technical and Technological systems Design» of Saratov State Technical University</p>
<p>Бочкарёв Пётр Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета</p>	<p>Bochkarev Pyotr Yuryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Technical and Technological systems Design» of Saratov State Technical University</p>
<p>Бокова Лариса Геннадьевна – ассистент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета</p>	<p>Bokova Larisa Genadievna – Junior Research Staff Member of the Department of «Technical and Technological systems Design» of Saratov State Technical University</p>

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 537.534, 620.179. 112.(075.8)
371-279-868

А.С. Носков, А.В. Королев

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ДОРОЖКИ КАЧЕНИЯ ПОДШИПНИКОВ ТВЕРДОЙ ГРАФИТОВОЙ СМАЗКИ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Экспериментальные данные процесса обработки ультразвуком дорожек качения упорных подшипников.

Ультразвуковое выглаживание, поверхностно-упрочняющая обработка, суперфинишная обработка

A.S. Noskov, A.V. Korolev

TECHNOLOGY RESEARCH APPLIED TO A SURFACE RACEWAY BEARING SOLID GRAPHITE LUBRICANT BY ULTRASONIC SURFACE TREATMENT

Experimental data processing ultrasound upornyhpodshipnikov raceways.

Ultrasonic processing, strengthening process, superfinish processing

При обработке дорожек качения упорных подшипников предложена идея о том, что применение УЗК активизирует поверхностные слои деталей, что позволяет их пластически

деформировать, тем самым формируя поверхность качения. При этом происходит активация поверхностных слоев металла, что приводит к возникновению дефектов в кристаллической решетке металла и позволяет наносить покрытие из углерода, с диффузионным эффектом.

На кафедре «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета разработана прогрессивная технология обработки поверхностей типа дорожек качения колец упорных подшипников ультразвуковым выглаживанием с нанесением твердой графитной смазки.

Для обеспечения заданных параметров качества дорожек качения колец упорного подшипника ультразвуковым выглаживанием важно определить рациональные режимы обработки. Для определения этих режимов провели экспериментальные исследования процесса выглаживания. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенной методики

В качестве объекта исследований использовались кольца подшипников 1118-2902840-04. Подшипник предназначен для восприятия радиальных и осевых нагрузок в верхней опоре стойки передней подвески автомобилей семейства ВАЗ, моделей «Калина», «Приора» и «Гранта».

Обработка дорожек качения упорных подшипников велась по следующей схеме: ось вращения кольца упорного подшипника устанавливается вертикально. Ось выглаживателя устанавливается параллельно оси кольца подшипника.

Графит использовали трех видов: терморасширенный графит мелкодисперсный, с размером частиц 0,1 мм, терморасширенный графит, с размером частиц 0,5 мм, и обычный аккумуляторный графит АКГ05 с размером частиц 0,3-0,5мм. На обрабатываемую поверхность насыпается графит в свободном, не связанном виде и в процессе обработки придавливается выглаживателем к обрабатываемой поверхности. Выглаживатель изготовлен из ВК6 двух размеров: $\Phi 5,2$ мм и $\Phi 5,6$ мм.

Для получения математической модели процесса выглаживания дорожек качения упорных подшипников использовали метод полу-факторного эксперимента 2^{4-1} .

Регулируемыми факторами являлись: Φ выглаживателя (5,2 мм и 5,6мм), время обработки (20 и 60 сек.), сила прижатия выглаживателя к обрабатываемой поверхности (10 кг и 16 кг) и частота вращения заготовки (240 и 360 об/мин).

За параметр оптимизации принята производительность процесса выглаживания. Ограничительными факторами являлись радиус дорожки качения R , и момент сопротивления вращению M .

Для проверки критерия однородности дисперсии использовался критерий Кохрена, с уровнем значимости 0,05, значимость коэффициентов регрессии оценивалась по t_1 - критерию Стьюдента с уровнем значимости 0,05, оценка адекватности модели определялась по критерию Фишера с уровнем значимости 0,05.

В результате обработки экспериментальных исследований были получены математические модели, устанавливающие связи радиуса дорожки качения, момента сопротивления вращению с основными влияющими факторами: диаметра выглаживателя, временем выглаживания t , силой давления на выглаживатель и частотой вращения заготовки n при обработке колец подшипников. Математические зависимости имеют следующий вид:

$$R = 1.097 \cdot R^{0.13} \cdot t^{0.02} \cdot P^{0.018} \cdot n^{0.01} \quad (1)$$

$$M = -1.33 \cdot R^{-0.124} \cdot t^{-0.079} \cdot P^{-0.103} \cdot n^{-0.036} \quad (2)$$

Как видно из равенства (1), непосредственное влияние на радиус дорожки качения оказывает диаметр выглаживателя и время обработки, сила воздействующая на выглаживатель и частота вращения заготовки тоже оказывает влияние, но в меньшей степени. Из равенства 2 видно, что два основных влияющих фактора на момент трения в подшипнике оказывают диаметр выглаживателя и сила, с которой он давит на обрабатываемую поверхность. В меньшей степени оказывают влияние время обработки и частота вращения заготов-

ки. При этом, как видно из уравнения 2 зависимость обратная, т.е. с увеличением основных параметров момент уменьшается.

На рис. 2 – 4 показано влияние на радиус дорожки качения подшипника исследуемых факторов. На каждом графике представлено влияние одного из факторов на верхнем, нижнем и промежуточных значениях прочих факторов. В подрисуночной подписи указаны размерности величин.

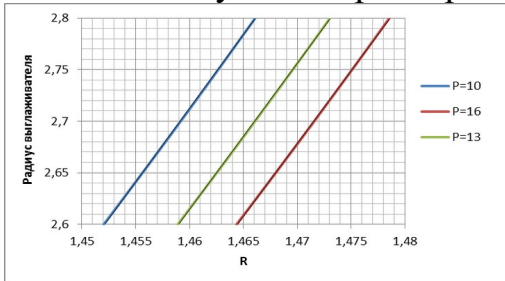


Рис. 1. Зависимость радиуса $R(r, t, P, n)$ (мм) дорожки качения подшипника от радиуса выглаживателя при максимальных, средних и минимальных значениях других факторов

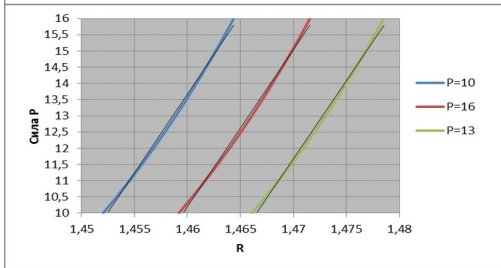


Рис. 2. Зависимость радиуса $R(r, t, P, n)$ (мм) дорожки качения подшипника от силы давления выглаживателя при максимальных, средних и минимальных значениях

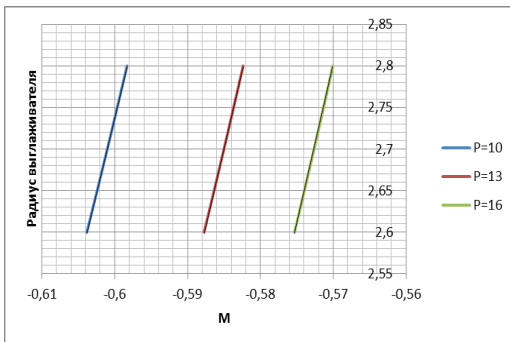


Рис. 3 Зависимость момента $M(r, t, P, n)$ (Н/м) подшипника от радиуса выглаживателя при максимальных, средних и минимальных значениях

Из рис. 2 видно, что при увеличении диаметра выглаживателя радиус дорожки качения подшипника тоже увеличивается. При этом изгибы на графике зависят от предыдущих методов обработки, т.е. имеет место технологическая наследственность. Из графика 4 видно что при увеличении нагрузки действующей на выглаживатель радиус дорожки качения тоже увеличивается.

По проведенному анализу на микрошлифах стало известно, что толщина слоя углерода на поверхности дорожки качения составляет до 0,5 мм. Глубина измененного слоя металла составляет составляет до 0,3 мм. Структура металла становится ферритной (рис. 4).

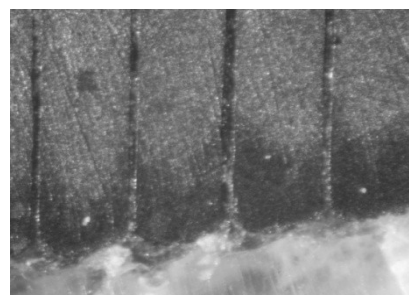
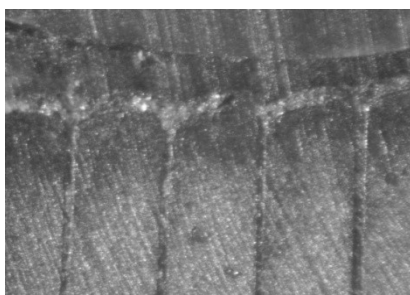


Рис. 4. фотографии микрошлифов дорожек качения с увеличением 1:100

Проведенные экспериментальные исследования показали, что:

1. Разработан новый перспективный способ обработки дорожек качения упорных подшипников.
2. Разработана методика полу-факторного эксперимента 2^{4-1} , позволяющего провести исследования на двух уровнях исследуемых факторов и тем самым снизить трудоемкость экспериментальных исследований, а так же выявить влияние каждого из исследуемых факторов.
3. Статистическая обработка результатов исследований обеспечила возможность выявить искомые математические зависимости. Математические модели адекватны с 95% вероятностью.
4. На основе выполненных исследований выявлены оптимальные режимы обработки:
 $r = 2.8 \text{ мм}$, $t = 30 \text{ с}$, $P = 16 \text{ кг}$; $n = 360 \text{ об / мин}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.П. Адлер/ Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий // Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова под ред. В.В. Яценко изд-во «Наука», М. 1976.

Королев Альберт Викторович – профессор, д.т.н., заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Korolev, Albert V. – PhD in Science, professor, head of the Technology of Machine, Saratov State Technical University

Носков Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Noskov, Aleksandr S. – postgraduate student of the Technology of Machine, Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.923.5

А.С. Носков, Т.А. Балтаев

**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ФИНИШНАЯ ОБРАБОТКА С ЭФФЕКТОМ НАНЕСЕНИЯ
ТВЕРДОЙ ГРАФИТНОЙ СМАЗКИ.**

В статье приведена концептуальная модель термопереноса углерода в процессе финишной обработки ультразвуковым выглаживанием, на формирование физико-механических свойств поверхностного слоя деталей.

Ультразвуковое выглаживание, поверхностно-упрочняющая обработка, суперфинишная обработка

A.S. Noskov, T.A. Baltayev

ULTRASONIC FINISHING PROCESSING WITH EFFECT OF DRAWING OF FIRM GRAPHITIC GREASING.

The article describes a conceptual model of the thermal transfer carbon during ultrasonic finishing smoothing, on the formation of the physical and mechanical properties of the surface layer of parts.

Ultrasonic burnishing, surface-hardening treatment, superfinishing

Важнейшим фактором, определяющим долговечность деталей, является качество их поверхностного слоя. Качество контактирующих поверхностей деталей оказывает большое влияние на параметры трения и изнашивания, долговечность, уровень шума, КПД машин и механизмов, в состав которых они входят. В настоящее время наиболее перспективным методов улучшения качества поверхностей деталей является импульсная упрочняющая ультразвуковая обработка (УЗО).

М.С. Нерубай [5.] показал, что введение в зону трения УЗК сопровождается структурно-термической активизацией контактных поверхностей, повышением их энергетического состояния. В результате чего возникает своеобразный эффект граничного трения где роль среды играет только поверхностный слой, находящийся в состоянии частичного трения.

Для обработки конструкционных сталей стандартное оборудование для УЗО дополнили системой смазывания поверхности детали смесью состоящей из графита и машинного масла, обеспечивающей насыщение поверхности детали углеродом и стабильность формируемых в процессе обработки нанокристаллических структур с зернами 5÷10 нм. Что приведет к цементации поверхностных слоев обрабатываемых деталей и существенному повышению твердости и прочности. Причем процесс выглаживания будет производиться одновременно с цементацией, что существенно повысит производительность обработки поверхностного слоя.

Рис.1. Схема процесса УЗО с насыщением поверхностного слоя графитом

Статическое усилие является определяющим параметром технологического режима УЗО, посредством которого можно управлять процессом упрочнения поверхностного слоя детали. Недостаточное статическое усилие не обеспечивает нужную деформацию поверхностного слоя [3] и нужной температуры для возникновения термомиграции углерода. Увеличивая параметр можно улучшать параметры микрорельефа обрабатываемой поверхности, но до определенного предела. Чрезмерное увеличение статического усилия приводит не только к ухудшению шероховатости но и к разрушению поверхностного слоя – перенаклепу.

УЗО основан на сообщении кинетической энергии рабочему телу с помощью ультразвукового поля, возникающего в замкнутом объеме при возбуждении в нем упругих механических колебаний ультразвуковой частоты.

Кинетическая энергия инструмента при ударе об обрабатываемую поверхность детали прямо пропорциональна его массе, квадрату амплитуды и частоты колебаний излучающей поверхности волновода. Величина амплитуды колебаний излучающей поверхности волновода зависит от подаваемой мощности [2].

При ударе об обрабатываемую поверхность инструмент проникает в неё на некоторую глубину $\Delta_{сж}$. В результате поверхность обрабатываемой детали подвергается кратковременному воздействию сжимающей силой $F_{сж}$. При этом выполняется работа A , энергия которой расходуется на деформацию поверхности и выделение тепловой энергии. Основная часть тепловой энергии поглощается деталью, меньшая часть – инструментом. В результате чего создается разность температур ($\text{grad } T \neq 0$).

Движущей силой для процесса переноса углерода служит градиент соответствующей величины. Основные физические характеристики явления переноса: векторная (локальная) – плотность потока j и скалярная (интегральная) – поток J .

$$J = \int_S (j, dS) = \int_S j_n dS \quad (1)$$

где S – площадь, через которую определяется поток.

Распределение углерода в детали и в смазке, которая в основном состоит из углерода, имеется неоднородность распределения концентрации C . Следовательно $\text{grad } C \neq 0$, значит возникает поток углерода, вектор плотности которого равен:

$$j_D = -D \text{grad } C \quad (2)$$

D – коэффициент диффузии данного компонента в рассматриваемой среде.

Во внешнем источнике углерода (смазке) концентрация однородная. А значит в зоне диффузии устанавливается постоянный диффузионный поток вещества. Запишем выражение (2) в виде:

$$j_D = -D \left(e_x \frac{\partial C}{\partial x} + e_y \frac{\partial C}{\partial y} + e_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Так как распространение вещества осуществляется только в одну сторону, значит преобразуем выражение (3) и получим:

$$j_D^x(x, t) = -D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \quad (4)$$

Полученное выражение называется одномерной записью первого закона Фика.

Первый закон Фика отражает поток вещества, направленный в сторону уменьшения градиента концентрации:

$$J_k = -D \frac{dc}{dx} \quad (5)$$

причем отношение $-D = \frac{j}{\frac{dc}{dx}}$ называется коэффициентом диффузии.
 x – ось, по которой направлен поток диффундирующего компонента.

При условии, что концентрация в рассматриваемом объеме изменяется во времени:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D \frac{dc}{dx} \right) \quad (6)$$

Это второй закон Фика.

Коэффициент диффузии – параметр, характеризующий скорость диффузии. Для металлов коэффициент диффузии изменяется по экспоненциальному закону:

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (7)$$

где D_0 – предэкспоненциальный или частотный множитель; Q – энергия активации; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура [1].

Q и D_0 связаны с физико-химическими свойствами металла, а также диффундирующих частиц. Экспоненциальный характер изменения коэффициента диффузии был установлен и теоретически обоснован Аррениусом. [4.]

Используя (6) для случая однородной диффузии, теплопроводности интегральный поток за время Δt вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta J_D^x &= -D \frac{\partial C}{\partial x} \Delta S \Delta t \\ \Delta J_D^x &= -k \frac{\partial C}{\partial x} \Delta S \Delta t \end{aligned} \quad (8)$$

где k – коэффициент теплопроводности среды, ΔS – площадь поверхности, перпендикулярной потоку, через которую переносится вещество и энергия.

О характере изменений физико-механических свойств поверхностного слоя (степени пластической деформации) в процессе обработки можно судить по коэффициенту упрочнения, который равен отношению твердости поверхностного слоя и основного металла:

$$k_{упр} = \frac{H_{max}}{H_0} \quad (9)$$

где H_{max} – микротвердость поверхностного слоя; H_0 – микротвердость основного металла [1].

Как выяснилось, коэффициент упрочнения периодически изменяется в течение всего процесса окончательной доводки.

Поток вещества, переносимого под воздействием активации поверхности пластическим деформированием:

$$J_\varepsilon = D_\varepsilon \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (10)$$

при условии изменения степени пластического деформирования во времени

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D_\varepsilon \frac{d\varepsilon}{dx} \right) \quad (11)$$

Молекулярно-кинетическая теория связывает явление переноса с тепловым хаотическим движением частиц среды, выделившейся при совершении работы при ударе о поверхность детали выглаживателя. Молекулы углерода, переходящие из одного слоя в другой, переносят с собой большую скорость направленного движения, которая поддерживается постоянной на всей глубине проникновения УЗК в материале заготовки, что обуславливает сравнительно глубокое проникновение углерода в поверхностные слои. Описанный эффект макроскопически проявляется в своеобразном трении между соседними слоями металла движущимися с неодинаковыми скоростями. Что объясняет выкрашивание металла при перенаклепе [2].

Молекулы, переходящие из одного слоя в другой, переносят с собой большую энергию теплового движения.

$$\langle W_k^0 \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{2}{3} kT \quad (12)$$

где W – средняя кинетическая энергия вещества; m_0 – масса молекулы; v^2 – средняя квадратичная скорость; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Элементарным актом диффузии в твердых телах является перескок диффундирующего атома из одного положения устойчивого равновесия в соседнее, т.е. на межатомное расстояние d . Отсюда средняя скорость диффузионного перемещения атомов равна:

$$\langle v_D \rangle = \frac{d}{\tau} \quad (13)$$

где τ – время.

Поэтому диффузия будет тем более быстрой, чем чаще происходят перескоки атомов через барьер, т. е. чем меньше время их оседлой жизни τ .



Рис. 2. Энергетические уровни положения атомов материала

Коэффициент диффузия в твердых телах крайне чувствителен к дефектам решетки, возникшим при нагреве, напряжениях, деформациях и др. воздействиях. Увеличение числа дефектов (главном образом вакансий) облегчает перемещение в твердом теле и приводит к росту коэффициента диффузия. Для коэффициента диффузия в твердых телах характерна резкая (экспоненциальная) зависимость от температуры. Так, коэффициент диффузия в при повышении температуры от 20 до 300°C возрастает в 10^{14} раз [4].

В зависимости от размера частиц свободного углерода на поверхности детали, изменяется скорость диффузирования углерода следующих видов диффузии:

-при уменьшении размера частиц углерода, возрастает ЭДС и концентеционная диффузия, происходит «науглероживание поверхности» из-за возникновения молекулярных сил которая связывает углерод на поверхности детали и углерода в структуре металла.

-при увеличении размера частиц углерода до определенного предела увеличивается баро-диффузия, появляется вдавливание и внедрение углерода в структуру металла.

Кроме прямых процессов, существуют ещё перекрёстные процессы. Примером перекрёстного процесса может служить термодиффузия - перенос вещества не вследствие градиента концентрации (это была бы обычная диффузия), а вследствие градиента температуры. Термодиффузия создаёт градиент концентрации, что приводит к появлению обычной диффузии. Если разность температур в системе поддерживается постоянной, то устанавливается стационарное состояние, при котором потоки вещества, вызванные градиентами температуры и концентрации, взаимно уравниваются. По мимо этого, от разности температур появляется разность потенциалов обусловленная разностью теплоемкости инструмента и детали, что приводит к появлению электродвижущей силы (ЭДС), которая создает дополнительный поток диффузирующего вещества. В момент удара выглаживателя о поверхность детали, появляется бародиффузия, т.е. происходит вдавливание углерода в поверхность детали.

ЛИТЕРАТУРА

4. Виноградов А.Н. Комплексная модель термомодеформационного переноса углерода в процессе финишной обработки шаров на шарошечном оборудовании / А.Н. Виноградов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. №3 Выпуск 1. С. 52-61.

5. Житников Ю.З. Величина наклепа при ультразвуковом деформационном упрочнении / Ю.З. Житников, В.А. Волобуев // Автоматизация и современные технологии. 2001. № 6. С. 3-4.

6. Лесюк Е.А. Влияние режима ультразвуковой упрочняющей обработки на качество обрабатываемой поверхности / Е.А. Лесюк, В.П. Алехин, Ким Чанг Сик. Вестник машиностроения. 2008. № 9.

7. Курс физики: учебник для вузов: В 2 т. Т.2. 2-е изд., / Под ред. В.Н. Лозовского. СПб.: Издательство «Лань», 2001. 592 с.

8. Нерубай М.С. Физико-механические методы обработки / Нерубай М.С. Куйбышев: КуАИ, 1979. 92 с.

Носков Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Балтаев Тимур Асхатович – магистрант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Noskov Aleksandr S. – postgraduate student of the Technology of Machine, Saratov State Technical University

Baltayev Timur Ashatovich – Saratov State Technical University, graduate student of «Mechanical Engineering»

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 67.02

А.О. Павлюков, В.А. Мелентьев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА И ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ АБРАЗИВА

Рассматривается способ обработки деталей свободным абразивом, задачи его исследования. Описывается взаимодействие абразивного зерна с поверхностью обрабатываемой детали.

Финишная обработка, абразив, сжатый воздух, точность

A.O. Pavlyukov, V.A. Melentyev

RESEARCH OF INTERACTION OF ABRASIVE GRAIN AND PROCESSED MATERIAL WHEN PROCESSING DETAILS IN PSEVDOOZHIZHENN THE ABRASIVE LAYER

The way of processing of details by a free abrasive, problems of its research is considered. Interaction of abrasive grain with a surface of a processed detail is described.

Finishing processing, the abrasive, the compressed air, accuracy

Качество обработки деталей характеризуется, в первую очередь, точностью размеров и отклонениями формы обработанной поверхности. При обработке незакрепленным шлифовальным материалом требуемые точностные параметры размеров и геометрической формы должны быть обеспечены предшествующими формообразующими операциями. Однако технологические задачи по обеспечению точности обработки, такие как соблюдение допусков на диаметральные и линейные размеры, достижение требуемой шероховатости рабочих поверхностей и радиусов скругления кромок должны быть решены при финишной обработке.

Одним из основных показателей процесса обработки деталей в статически уплотненной абразивной среде является производительность, оцениваемая интенсивностью съема ме-

талла с обрабатываемых поверхностей. При этом на съём металла влияет большое количество факторов, характеризующих свойства обрабатывающих сред и материала детали, режимы и условия обработки. Таким образом, актуальность работы связана с постоянно растущими требованиями к производительности процессов обработки при сохранении или повышении качества обработки металлических деталей. Поскольку традиционные технологии исчерпали свои возможности, то решение такой задачи может быть достигнуто за счет разработки принципиально новой высокоэффективной технологии.

Новая технология позволяет повысить эффективность обработки детали в псевдооживленном слое абразива за счёт расширения номенклатуры обрабатываемых деталей с различными размерными характеристиками. По данной технологии [1] обрабатываемая деталь и абразивная среда находятся в корпусе, связанном с источником сжатого воздуха. Соединение рабочей камеры с источником сжатого воздуха происходит при помощи специального устройства в виде кольца, которое снабжено роликами с отверстиями, которыми осуществляется поворот воздушных струй и изменение угла падения воздушно-абразивной струи на обрабатываемую поверхность. За счет осуществления регулируемого поворота каждого ролика вокруг своей оси обеспечивается возможность настройки установки на обработку деталей с различными размерами обрабатываемой поверхности в достаточно широком диапазоне.

В результате проводимых исследований разрабатывается новый технологический процесс. Эта технология, наряду с резким повышением производительности труда, обеспечивает повышение точности геометрических параметров изделий и качества обработки поверхности. Эффективная обработка возможна при использовании оптимальных режимов, которые требуется определить в ходе исследований.

Для достижения поставленной задачи необходимо:

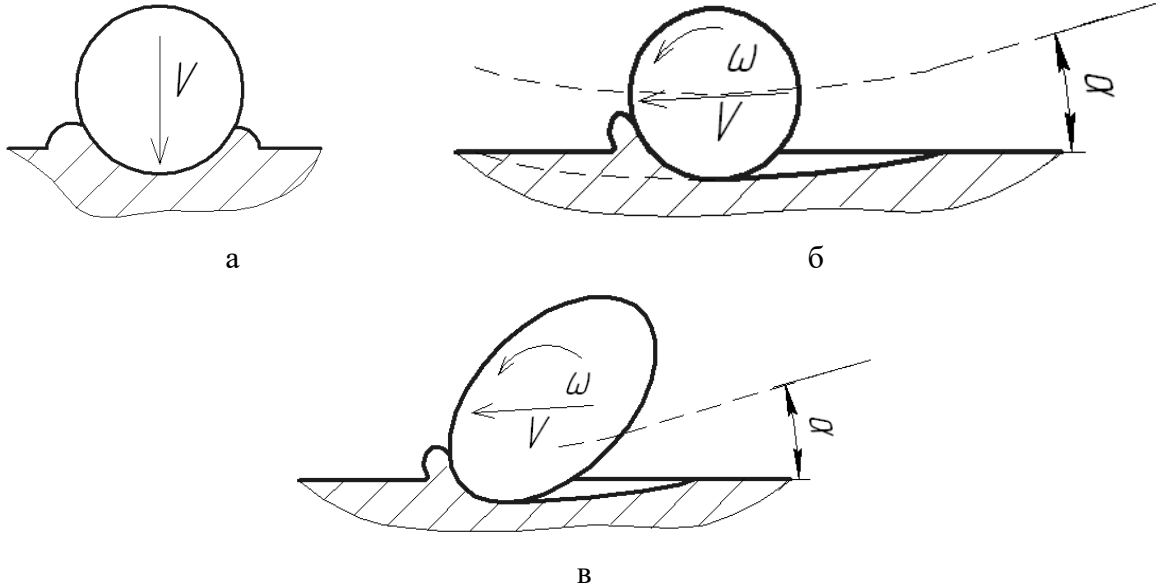
- провести анализ существующих методов обработки деталей несвязанным абразивом, оценить результаты и недостатки существующих методов;
- провести анализ геометрических размеров обрабатываемой детали;
- разработать и оптимизировать метод обработки деталей несвязанным абразивом;
- провести полное описание полученного метода.

Прежде всего необходимо описать процесс взаимодействия единичного зерна с обрабатываемой поверхностью. Изучение процессов абразивной обработки в настоящее время наиболее часто осуществляется с помощью системного подхода. Взаимодействие заготовки и инструмента является многофакторным процессом со множеством входных, выходных переменных, а также параметров состояния.

Характер взаимодействия единичного абразивного зерна зависит от формы зерна и от направления его движения относительно поверхности заготовки. Если упрощённо рассматривать абразивное зерно в виде сферы, а обрабатываемую поверхность считать плоской, то можно предположить несколько вариантов взаимодействия.

Первый вариант – угол между направлением движения частицы и поверхностью близок к перпендикуляру (рис.1 а). В этом случае имеет место пластическая деформация поверхностного слоя, не приводящая к съёму металла. Вторым вариантом – абразивное зерно сталкивается с поверхностью заготовки под некоторым углом (рис.1 б). Взаимодействие происходит в следующей последовательности: движимое силой инерции зерно внедряется в поверхность заготовки, срезая стружку. Под действием сил трения зерно начинает вращение, и съём стружки уменьшается, начинает преобладать пластическая деформация металла. Когда сила инерции значительно ослабевает, силы упругой деформации отталкивают зерно от поверхности металла, взаимодействие заканчивается.

В случае рассмотрения абразивного зерна вытянутой формы (рис.1 в), процесс внедрения его в поверхность металла при вращении будет иметь неравномерный характер, поскольку радиус контактирующего с поверхностью индентора будет изменяться. В остальном же процесс взаимодействия аналогичен предыдущему случаю.



Взаимодействие абразивного зерна с заготовкой

Более тщательное изучение процесса обработки деталей несвязанным абразивом позволит выявить факторы, влияющие на интенсивность и качество обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 2210484 Российская Федерация. Устройство для обработки деталей в псевдооживленном слое абразива / П.Ю.Бочкарев, С.П.Еретин, А.М.Чистяков. 2001. Бюл. № 23.

Павлюков Антон Олегович – аспирант кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Pavlyukov Anton Olegovich – the graduate student of the Department of «Designing technical and technological complex» of the Saratov State Technical University

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 the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.923

В.В. Погораздов, В.О. Горбачёв

МОДЕЛИРОВАНИЕ В Mathcad ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МЕЖЗУБЦОВОЙ ВПАДИНЫ РЕЙКОЙ С ФЛАНКОМ И ПРОТУБЕРАНЦЕМ

Моделируется процесс формообразования межзубцовой впадины зубчатого колеса плоской рейкой с протуберанцами и фланками на её исходном контуре. Решение найдено на основе представления многоэлементного

исходного контура инструмента табличными функциями, аппроксимации их кубическими сплайнами, а также путём использования профильных нормалей и графических ресурсов системы Mathcad.

Рейка, исходный контур, протуберанец, фланк, численное дифференцирование, профильная нормаль, полюс зацепления, огибающая, переходная кривая, шевингование

V.V. Pogorazdov, V.O. Gorbachev

MODELING IN Mathcad SHAPING DEPRESSION RAKE WITH THE FLANKS AND PROMINENCES

Simulate the forming cavities flat rail with prominences and flanks to its original contour. The solution is found through submission to the multi-element initial contour tool tabular piecewise functions, approximation of cubic splines, and use the normal profile and image resources of Mathcad.

Rail, the original contour, prominence, flank, numerical differentiation, the normal profile, the pole engagement, envelope, transition curve, shaving

Для формирования припуска под шевингование и шлифование зубьев быстроходных и тяжело нагруженных зубчатых передач в настоящее время используются специальные технологии и инструмент на основе реек (рис. 1а) с модифицированным исходным контуром 0-1-2-3-4-5 (рис. 1б). Переходная кривая на профиле зуба с его нормированным подрезанием обеспечивается протуберанцем 1-2-3, а срез головки зуба фланком 4-5 исходного контура.

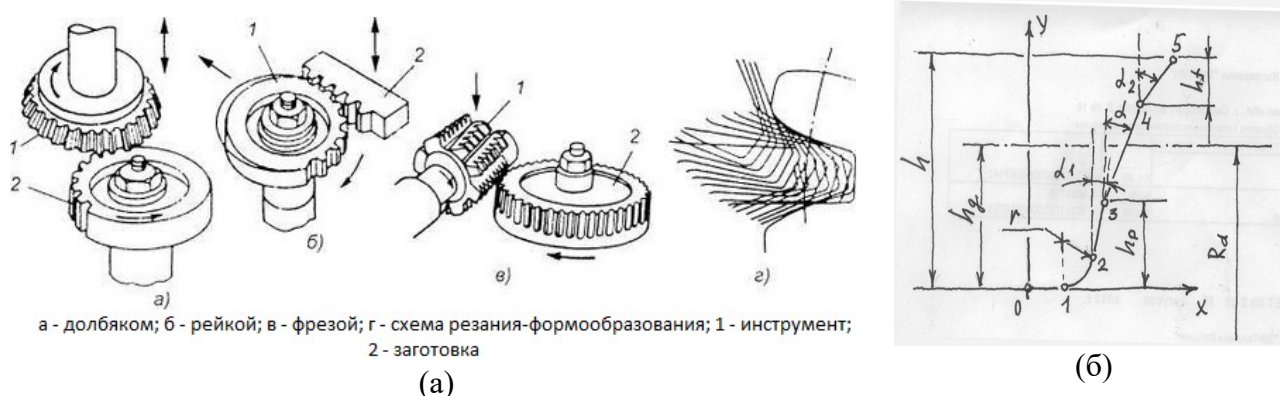


Рис. 1. Схемы зубообработки реечным инструментом и его исходный контур

Профиль межзубцовой впадины обрабатываемого колеса, будучи огибающим, семейства инструментального контура в технологическом зацеплении (рис. 1а), не описывается простыми функциями, поэтому он априорно может быть определён и проанализирован только на основании специальных машинных расчётов, моделирующих технологическое зацепление обрабатываемого колеса с инструментальной рейкой.

Опишем сначала исходный инструментальный контур двумя массивами $[X_{s4}], [Y_{s4}]$ декартовых координат его точек в системе XOY (рис. 1б), размеры которых могут ограничиваться лишь возможностью компьютера пользователя. Приняв и обозначив соответственно символами n, g, m, p числа точек на отрезках контура 0-1-2-3-4-5, приходим к их размерности $s4=n+m+g+p+1$. Наполняются массивы на основании актуальных параметров контура (часть показана на рис. 1б, $m=5\text{мм}$, $Z=16$.) и несложных вычислений, приведённых в данной статье

в виде фрагментов листинга Mathcad-программы [1]. Отметим, что фрагменты листинга даны в статье на изменённом фоне текста.

Часть массивов для прямолинейного отрезка 0-1 формируется программной конструкцией с ранжированной переменной i и линейной дискретой $\Delta 1$:

$$\Delta 1 := \frac{\left[\left(\frac{W}{2} \right) + hp \cdot \tan(\alpha 1) - rv \cdot \tan\left[\left(\frac{\pi}{4} \right) - \alpha 1 \right] \right]}{n} \quad i := 0..n \quad X_i := 0 + \Delta 1 \cdot i \quad Y_i := 0$$

Часть массивов для дугового отрезка 1-2 формируется с учётом угловой дискретности Δv , радиуса окружности сопряжения rv и угла сопряжения протуберанца $\alpha 1$ алгоритмом:

$$\Delta v := \frac{\left[\left(\frac{\pi}{2} \right) - \alpha 1 \right]}{g} \quad i := 0..g \quad X_{i+n} := X_n + rv \cdot \sin(\Delta v \cdot i) \quad Y_{i+n} := Y_n + rv \cdot (1 - \cos(\Delta v \cdot i))$$

Часть массивов для прямолинейного участка протуберанца с его линейной дискретой $\Delta 2$ формируется алгоритмом:

$$\Delta 2 := hp \cdot \frac{\tan(\alpha 1)}{m} \quad i := 0..m \quad X_{i+n+g} := X_{n+g} + \Delta 2 \cdot i \quad Y_{i+n+g} := Y_{n+g} + \Delta 2 \cdot \frac{i}{\tan(\alpha 1)}$$

Часть массивов для основной линии контура с профильным углом α (угол зацепления) и линейной дискретой $\Delta 3$ формируется алгоритмом:

$$\Delta 3 := |h - hf - Y_{n+g+m}| \cdot \frac{\tan(\alpha)}{p} \quad i := 0..p \quad X_{i+g+n+m} := X_{g+n+m} + \Delta 3 \cdot i \quad Y_{i+g+n+m} := Y_{g+n+m} + \Delta 3 \cdot \frac{i}{\tan(\alpha)}$$

И наконец оставшаяся часть массивов для фланка с его дискретой $\Delta 4$ формируется так:

$$\Delta 4 := |h - Y_{n+g+m+p}| \cdot \frac{\tan(\alpha 2)}{l} \quad i := 0..l \quad X_{i+g+n+m+p} := X_{g+n+m+p} + \Delta 4 \cdot i \quad Y_{i+g+n+m+p} := Y_{g+n+m+p} + \Delta 4 \cdot \frac{i}{\tan(\alpha 2)}$$

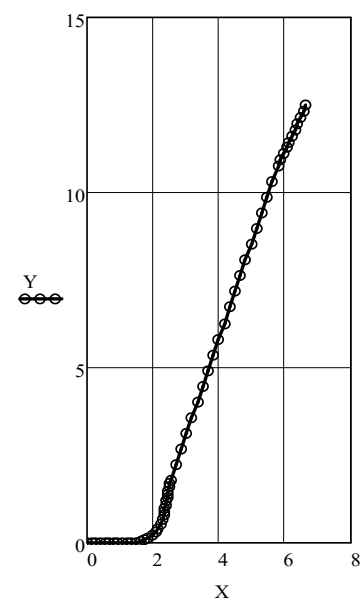
В итоге получаем два объединённых массива координат точек исходного контура $[X_{s4}]$, $[Y_{s4}]$ (рис.2а) и его график в системе ортогональных координат с осями равных масштабов (рис.2б)

X =

	0
0	0
1	0.134
2	0.268
3	0.402
4	0.536
5	0.67
6	0.804
7	0.938
8	1.072
9	1.206
10	1.34
11	1.476
12	1.609
13	1.737
14	1.858
15	1.97
16	...

Y =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	$9.252 \cdot 10^{-3}$
12	0.037
13	0.082
14	0.145
15	0.223
16	...

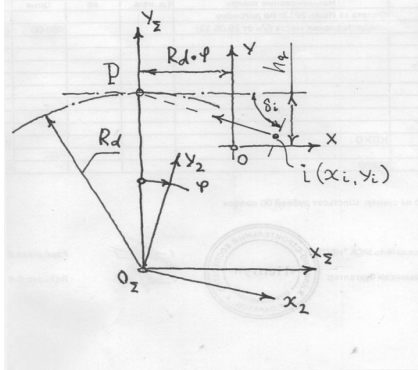


(а)

(б)

Рис.2. Массивы координат (а) и график исходного контура (б)

Отообразим массивы $[X_{s4}], [Y_{s4}]$ в систему нарезаемого колеса X_2, Y_2 согласно схеме технологического зацепления (рис.3а) и алгоритма программы Mathcad (рис.3б).



(а)

```

i := 0..n + m + g + p + 1   phi := -0.6, -0.59.. 0.6

X2(phi, i) := [(X_i + Rd * phi) * cos(phi) - (Y_i + Rd - hg) * sin(phi)]

Y2(phi, i) := (X_i + Rd * phi) * sin(phi) + (Y_i + Rd - hg) * cos(phi)
    
```

(б)

Рис.3. Схема технологического зацепления (а) и его знаковая модель (б)

Реализация алгоритма технологического зацепления исходного контура с межзубцовой впадиной в диапазоне изменения угла обкатки $-0.6 \leq \phi \leq 0.6$ (рад.) показано на рис.4. На графике обозначенными трассировками отражены траектории характерных точек контура, а также показаны: делительная окружность R_d , окружности выступов и впадин нарезаемого колеса.

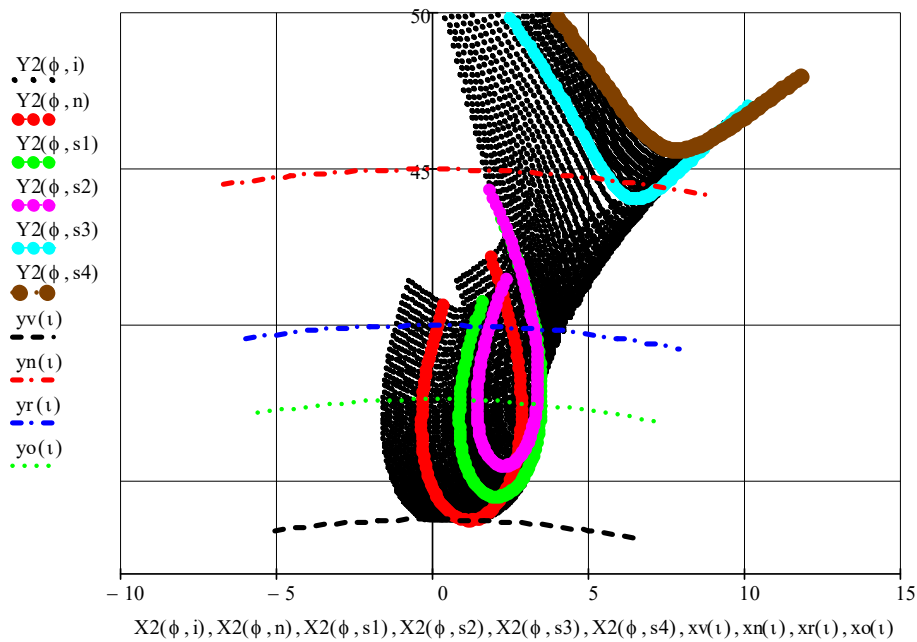


Рис.4. Результаты численного моделирования технологического зацепления

Представляется вполне очевидным и то, что полупрофиль межзубцовой впадины «обволакивает» структуру линий на графике с «юго-восточной стороны». При этом достаточно отчётливо просматриваются зоны подрезания профиля и его фланкирование. Чётко видно и то, что в подрезании профиля наиболее активную роль играет точка стыка радиусного и прямолинейного участков фланка (третья трассировка на графике рис.4).

Для строго численного выделения из геометрической структуры обволакивающего его профиля в данном исследовании был использован дифференциальный метод моделирования на основе нормалей к исходному контуру, проходящих в технологическом зацеплении в момент контакта через полюс P (см. рис.3а). Нормали к инструментальному контуру, дискретно

заданному массивами $[X_{s4}], [Y_{s4}]$, можно определить, если его предварительно «сгладить», например, кубическими сплайнами встроенной в Mathcad процедурой:

```
s := cspline(X, Y) A(t1) := interp(s, X, Y, t1) t1 := 0, 0.05.. 6.6
```

После аппроксимации исходный профиль будет представлять дифференцируемая функция $A(t1)$ от скалярного аргумента $t1$, изменяемого в расчётном алгоритме ранжированной переменной в диапазоне массива $[X_{s4}]$ с выбранным в зависимости от точности расчёта шагом. Процедура численного (без предельного перехода) дифференцирования функции исходного профиля $A(t1)$ и формирования массива производных δ_i реализуется в программе по следующему алгоритму:

```
i := 0..s4
t1_i := i * X_s4 / s4
X_i := t1_i
Y_i := A(t1_i)
delta_i := (A(t1_i + 0.00001) - A(t1_i)) / 0.00001
```

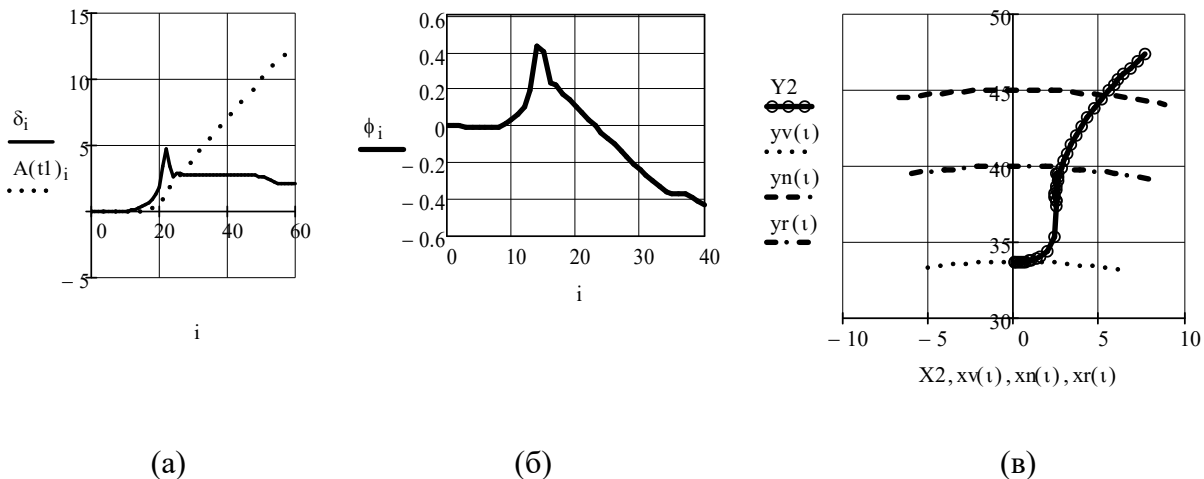
Имея массив нормалей к исходному контуру δ_i и выражение для связи угла обкатки ϕ_i с точкой на контуре X_i по условию технологического зацепления:

$$\phi_i := \frac{[\delta_i \cdot (hg - A(t1)_i) - X_i]}{Rd}$$

находим координаты точек огибающего семейства (по параметру ϕ) инструментального контура ниже следующей программной конструкцией:

```
X2_i := (X_i + Rd * phi_i) * cos(phi_i) - (A(t1)_i + Rd - hg) * sin(phi_i)
Y2_i := (X_i + Rd * phi_i) * sin(phi_i) + (A(t1)_i + Rd - hg) * cos(phi_i)
```

На рис. 5а, б, в показаны графики изменения производных (а), угла обкатки (б) и профиль межзубцовой впадины, построенный по дифференциальным характеристикам исходного инструментального контура.



(а) (б) (в)
Рис.5. К расчёту профиля впадины по дифференциальным характеристикам инструментального контура

Сравнивая контур, полученный по дифференциальным характеристикам исходного контура и «обволакивающий» юго-восточную границу структуры на рис.4, можно заметить их достаточно чёткое совпадение. Данное обстоятельство служит надёжным тестом показанных в статье моделей и расчётных программ, а также доказательством возможности их взаимно-дополнительного применения особенно в случаях, когда дифференциальное моделирование фиксирует формальное «ребро возврата», показанное на профиле впадины (рис.4в). Во многом из-за этого дифференциальные методы исследования процессов формообразования сложных поверхностей в настоящее время и утрачивают своё былое значение.

Авторы полагают, что данные в статье разъяснения будут полезны специалистам в методологическом отношении и покажут возможности системы Mathcad , как средства под-

держки процессу подготовки зубопрофилирующих операций на машиностроительном производстве и учебного процесса по курсу САПР зуборезного инструмента в ВУЗе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирьянов Д.В. Mathcad 13 / Д.В. Кирьянов. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 608 с.

Погораздов Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета.

Горбачёв Валерий Олегович – аспирант кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино и приборостроении» Саратовского государственного технического университета.

Pogorazdov Valery Vasilievitch – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Designing and Computer Modeling of Technolgical Eguipment in Machine and Instrumen Builing» of the Saratov State Technical University.

Gorbachev Valeriy Olegovich – Graduate student of «Design and Computer Simulation Technology of the equipment in the car and Pribram-structure» of the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.623

О.П. Решетникова, А.В. Королев

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОРОЖЕК КАЧЕНИЯ КОЛЕЦ УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ

В статье рассматривается математическое моделирование процесса формирования точностных параметров дорожек качения колец упорных подшипников. Получена зависимость толщины дорожки качения по дну канавки от технологических факторов обработки.

Подшипник, геометрические параметры, шлифование, математическая модель

O.P. Reshetnikova, A.V. Korolev

MATHEMATICAL MODEL OF FORMATION PRECISION PARAMETERS OF RACE OF BEARING RINGS

This article deals with the mathematical modeling of the process of formation of accuracy parameters raceway rings of bearings. The dependence of the thickness of the race to the bottom groove on technological factors processing.

Bearing, geometrical parameters, grinding, mathematical model

Наиболее распространенным способом окончательной обработки точных деталей, типа колец подшипников является шлифование. Это, прежде всего, объясняется тем, что абразивным инструментом можно обеспечить наивысшую точность и минимальную шероховатость поверхностей деталей из различных сплавов.

На кафедре «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. разработана прогрессивная технология шлифования фасонных поверхностей типа дорожек качения колец упорных подшипников торцом чашечного шлифовального круга [1]. Экспериментальные исследования данной технологии показали ее высокую эффективность перед традиционными методами обработки. Однако для более полного понимания процесса съема припуска и формирования геометрии дорожки качения необходимо построить математическую модель связывающую геометрические параметры дорожки качения с технологическими факторами.

В качестве объекта исследования рассмотрим процесс обработки дорожек качения упорных подшипников способом торцевого (лобового) фасонного шлифования (рис. 1).

Сущность предлагаемого способа обработки состоит в следующем. Ось вращения кольца упорного подшипника 4 устанавливают под острым углом α к направлению подачи шлифовального круга 1, а ось шлифовального круга 1 устанавливают вдоль направления подачи S круга. Шлифовальный круг подвергают правке, в результате которой придают его рабочей поверхности тороидальную форму профиля, которая является зеркальным отражением формы профиля, которую требуется получить на обрабатываемой поверхности детали.

В процессе шлифования деталь 4 и шлифовальный круг вращают в противоположных направлениях, осуществляют быстрый подвод шлифовального круга к обрабатываемой поверхности, а затем осуществляют врезание рабочей поверхности круга в поверхность детали с рабочей подачей S , обеспечивающей заданный размер. После достижения заданного размера детали шлифовальный круг отводят в исходное положение.

Угол α устанавливают таким образом, чтобы каждая режущая кромка абразивного инструмента в процессе вращения шлифовального круга периодически входила и выходила из контакта с обрабатываемой поверхностью 2 детали 4. Это обеспечивает очистку рабочей поверхности инструмента от стружки, способствует отводу тепла из зоны обработки и повышению производительности обработки.

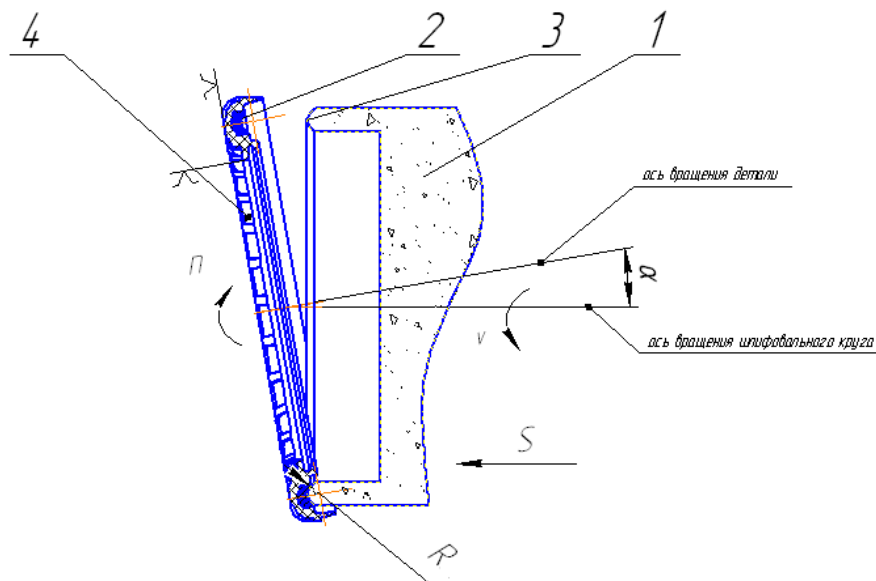


Рис.1. Схема шлифования дорожек качения упорных подшипников способом торцевого шлифования

Так как ось вращения шлифовального круга устанавливают в направлении подачи, то износ круга не влияет на диаметр шлифуемой поверхности, что обеспечивает высокую точ-

ность обработки и возможность осуществления правки шлифовального круга после обработки нескольких деталей.

Изменяя соотношения скорости вращения заготовки, подачи и окружной скорости вращения шлифовального круга, а так же времени выхаживания при остановке рабочей подачи, можно получить различные геометрические параметры дорожки качения упорных подшипников. Обычно шлифование дорожек качения осуществляются периферией шлифовального круга дисковой формы. Но для обеспечения требуемой точности обработки шлифование этих поверхностей осуществляется кругом небольшого диаметра, что приводит к повышенному его износу и необходимости правки после каждой обработанной детали и частой замене круга. Это резко снижает производительность обработки.

Способ торцевого фасонного шлифования позволяет создать регулируемые параметры дорожек качения упорных подшипников, что позволяет повысить эффективность шлифования, повышает износостойкость детали и уменьшает износ дорогостоящего инструмента.

Для построения математической модели формирования геометрических параметров дорожек качения упорных подшипников при торцевом фасонном шлифовании были приняты некоторые допущения, основные из которых следующие:

1. Вибрация технологической системы мала по сравнению с величиной снимаемого припуска. В ходе проведения экспериментальных исследований было выявлено, что вибрация технологической системы составляет 0,05 мкм. Эта величина несравнимо мала по сравнению с допуском на размер получаемой детали, поэтому величиной вибрации технологической системы можно пренебречь.

2. Основное влияние на получаемый размер детали оказывает упругая деформация технологической системы, так как площадь контакта детали и шлифовального круга большая и сила резания при шлифовании велика.

3. Износ шлифовального круга мал по сравнению с величиной снимаемого припуска.

4. Величина подачи шлифовального круга в каждом конкретном случае обработки не изменяется и является постоянной.

Приведенные выше допущения позволяют проводить построение некоторой идеализированной математической модели. Но принятые допущения не вносят существенных погрешностей в построение математической модели и позволяют выделить влияние на формирование профиля детали основных технологических факторов.

Рассмотрим механизм снятия припуска в процессе шлифования дорожки качения кольца радиально-упорного подшипника. Возьмем декартову систему координат Y_0X (рис.2).

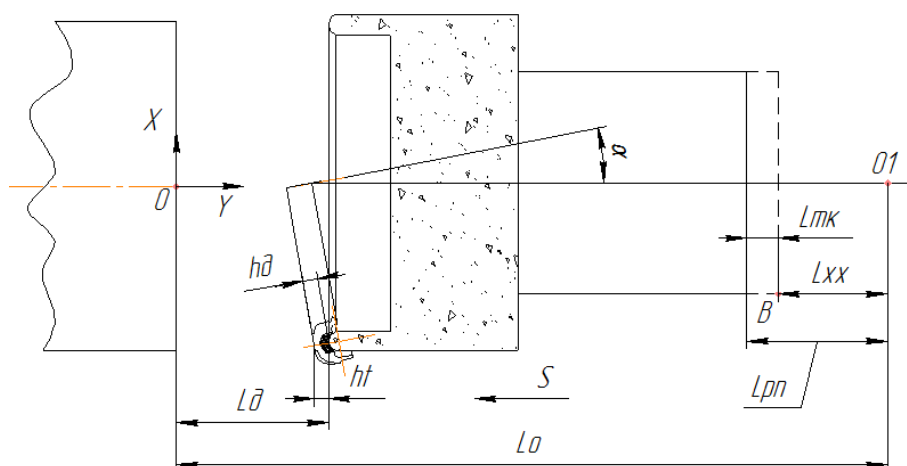


Рис. 2. Схема процесса шлифования

Центр системы координат O поместим в точке, соответствующей нулевой точке станка. Ось OY направим в направлении перемещения шлифовального круга. Ось OX расположим перпендикулярно оси OY .

На рис. 2. показано:

L_{PH} – ход шлифовального круга с рабочей подачей, мм;

L_{XX} – холостой ход с рабочей подачей до точки касания шлифовального круга с деталью, мм;

L_{mk} – расстояние от момента касания шлифовального круга с деталью до момента отключения рабочей подачи, мм;

L_o – расстояние между нулевыми точками станка, мм;

α – угол наклона между осью вращения детали и осью шлифовального круга, мм;

L_o – расстояние от нулевой точки станка до рабочей поверхности шлифовального круга в момент обработки, мм;

h_o – толщина кольца по дну канавки, мм;

h_t – проекция толщины кольца по дну канавки на ось OY , мм.

Рассмотрим процесс шлифования от момента касания шлифовального круга с деталью до начала выхаживания (рис. 3).

Величина толщины кольца по дну канавки в текущий момент времени τ равна:

$$h_t = h_o - q_\tau, \quad (1)$$

где h_t – текущая толщина кольца по дну канавки, мм; q_τ – величина съема припуска в момент времени τ , мм.

Ход шлифовального круга с рабочей подачей равен:

$$L_{PH} = S \cdot (\tau_p + \tau_{XX}), \quad (2)$$

где S – подача шлифовального круга, мм/мин; τ_{XX} – время холостого хода, до точки касания шлифовального круга с деталью, мин; τ_p – время обработки детали с момента касания шлифовального круга с деталью, мин.

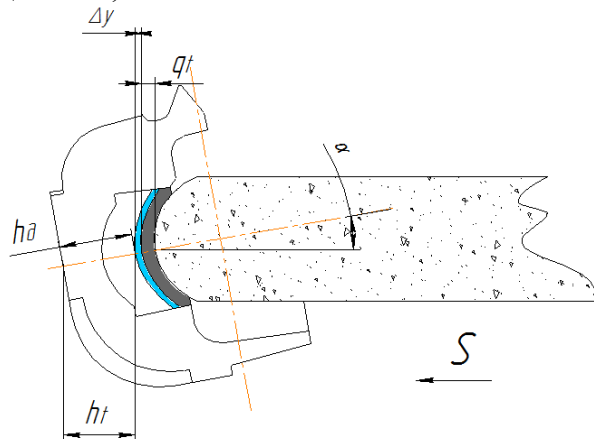


Рис. 3. Схема процесса шлифования от момента касания шлифовального круга с деталью до момента начала выхаживания

Рассмотрим процесс шлифования с момента касания шлифовального круга с деталью.

С учетом упругих деформаций обрабатываемой детали Δy_d и шлифовального круга Δy_K расстояние от точки касания с деталью до точки выключения рабочей подачи.

$$L_{TK} = q_\tau + \Delta y_d + \Delta y_K. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3), получим:

$$S \cdot \tau_p = q_\tau + \Delta y_d + \Delta y_K, \quad (4)$$

откуда

$$q_{\tau} = S \cdot \tau_p - \Delta y_D - \Delta y_K \quad (5)$$

Подставим выражение (5) в выражение (1):

$$h_t = h_z - (S \cdot \tau_p - \Delta y_D - \Delta y_K) = h_z - S \cdot \tau_p + \Delta y_D + \Delta y_K \quad (6)$$

Сумма $y = (\Delta y_D + \Delta y_K)$ есть упругая деформация технологической системы, тогда

$$h_t = h_z - S \cdot \tau_p + y \quad (7)$$

С учетом угла наклона между осью вращения детали и осью шлифовального круга α найдем толщину кольца по дну канавки h_o :

$$h_o = \frac{h_t}{\cos \alpha} \quad (8)$$

Тогда выражение (7) примет вид:

$$h_o = \frac{h_z - S \cdot \tau_p + y}{\cos \alpha} \quad (9)$$

Величина упругой деформации технологической системы равна:

$$y = k_s \cdot P_y^{\alpha}, \quad (10)$$

где P_y – радиальная (нормальная) составляющая силы резания, Н; $\alpha < 1$ – показатель степени; k_s – податливость технологической системы, мм/Н.

Как известно [3], податливость технологической системы определяется отношением приращения смещения режущей кромки инструмента относительно обрабатываемой поверхности (упругие деформации технологической системы) Δy к приращению радиальной силы резания ΔP_y , направленной в том же направлении:

$$k_s = \frac{\Delta y}{\Delta P_y}, \quad (11)$$

Многочисленными исследованиями установлено [2, 3], что при врезном шлифовании между радиальной силой резания P_y и скоростью съема припуска $V = \frac{dy}{d\tau}$ существует линейная зависимость:

$$\frac{dy}{d\tau} = k_V \cdot \Delta P_y \quad (12)$$

где k_V – режущая способность шлифовального круга – произведение частоты вращения детали n и параметра шлифования T , равного глубине внедрения шлифовального круга в деталь под действием единичной силы резания [2, 4]:

$$k_V = n \cdot T, \frac{MM}{мин \cdot H} \quad (13)$$

Исходя из того, что сила резания P_y , уравнивается упругой системой станка, запишем:

$$\frac{V^{\beta}}{k_V} = - \left(\frac{y}{k_s} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (14)$$

Запишем уравнение (14) в дифференциальной форме:

$$\frac{1}{k_V} \cdot \left(\frac{dy}{d\tau_p} \right)^{\beta} + \left(\frac{y}{k_s} \right)^{\frac{1}{\alpha}} = 0. \quad (15)$$

Уравнение (14) имеет решение в общем виде, но коэффициенты и показатели, входящие в уравнение, могут изменяться в широких пределах, а их экспериментальное определение в условиях производства достаточно трудоемко и затруднено. Поэтому для отдельного достаточно малого участка процесса шлифования, предположим, что $\alpha = \beta = 1$, тогда $k_V = const$, $k_s = const$.

Для процесса шлифования за счет накопленного в технологической системе упругого натяга:

$$\frac{1}{k_V} \cdot V = -\frac{y}{k_S} \quad (16)$$

Или в дифференциальной форме:

$$\frac{1}{k_V} \cdot \frac{dy}{d\tau_p} + \frac{y}{k_S} = 0. \quad (17)$$

Отсюда скорость изменения упругой деформации

$$V_y = V \cdot e^{\left(\frac{k_V \cdot \tau_p}{k_S}\right)} \quad (18)$$

Величина упругой деформации технологической системы равна:

$$y = \int V_y \cdot d\tau_p = \int V \cdot e^{\left(\frac{k_V \cdot \tau_p}{k_S}\right)} d\tau_p = V \cdot \frac{k_S}{k_V} \cdot e^{\left(\frac{k_V \cdot \tau_p}{k_S}\right)}, \quad (19)$$

В свою очередь из работ М.М. Тверского [2] текущая скорость съема припуска равна:

$$V = V_S \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_V \cdot \tau_p}{k_S}}\right), \quad (20)$$

где V_S – скорость подачи.

В нашем случае величина V_S может быть принята равной подаче S .

Подставляя выражение (20) в выражение (19) получим:

$$y = S \cdot \frac{k_S}{k_V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_V \cdot \tau_p}{k_S}}\right) \cdot e^{\left(\frac{k_V \cdot \tau_p}{k_S}\right)}. \quad (21)$$

Текущая величина толщины дорожки качения по дну канавки при шлифовании:

$$h_0 = \frac{h_z - S \cdot \tau_p + y}{\cos \alpha} = \frac{h_z - S \cdot \tau_p + S \cdot \frac{k_S}{k_V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_V \cdot \tau_p}{k_S}}\right) \cdot e^{\left(\frac{k_V \cdot \tau_p}{k_S}\right)}}{\cos \alpha} \quad (22)$$

Как видно из формулы (22) текущая величина толщины кольца по дну канавки при обработке детали с включенной рабочей подачей зависит от величины этой подачи и от времени обработки. Рабочая подача в свою очередь оказывает противоречивое влияние на величину съема припуска при обработке. С одной стороны подача напрямую влияет на припуск, т.е. с увеличением подачи припуск снимается интенсивнее. С другой стороны увеличение подачи усиливает сопротивление технологической системы, что замедляет съем припуска. Время обработки так же влияет на текущую величину толщины кольца по дну канавки напрямую: с увеличением времени обработки снимается большая величина припуска. При увеличении угла наклона между осью вращения детали и осью шлифовального круга увеличивается текущая толщина детали, так как площадь контакта круга с дорожкой качения уменьшается, что способствует уменьшению влияния упругой деформации технологической системы. Однако, в ходе проведения экспериментальных исследований было доказано, что оптимальное значение угла α составляет 5-8⁰.

Однако, выражения (16) – (22) справедливы для отдельных, достаточно коротких интервалов времени, когда верны предположения, что $k_V = const$ и $k_S = const$.

Рассмотрим процесс шлифования с момента остановки подачи, т.е. с момента начала выхаживания. При выхаживании будет так же сниматься небольшой припуск. Найдем зависимость величины припуска от времени выхаживания.

$$h_{тв} = h_0 - q_{\tau_6}, \quad (23)$$

где $h_{тв}$ – текущая толщина кольца по дну канавки при выхаживании; h_0 – толщина кольца по дну канавки на момент выключения рабочей подачи; q_{τ_6} – текущий съем припуска во время выхаживания.

При выхаживании текущий съем припуска будет равен величине упругой деформации технологической системы:

$$q_{\tau_0} = y_0. \quad (24)$$

Известно, что

$$y_0 = S_0 \cdot \frac{k_S}{k_V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_V \cdot \tau_0}{k_S}} \right) \cdot e^{\left(\frac{k_V \cdot \tau_0}{k_S} \right)}, \quad (25)$$

где S_0 – подача шлифовального круга на начало выхаживания.

Подставляя (25) в выражение (23) с учетом того, что величина рабочей подачи и величина подачи на момент ее останова равны: $S = S_0$, получим:

$$h_{\tau_0} = h_0 - S \cdot \frac{k_S}{k_V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_V \cdot \tau_0}{k_S}} \right) \cdot e^{\left(\frac{k_V \cdot \tau_0}{k_S} \right)} \quad (26)$$

С учетом угла наклона между осью вращения детали и осью шлифовального круга α найдем текущую толщину кольца по дну канавки при выхаживании h_{τ_0} :

$$h_{\tau_0} = \frac{h_0 - S \cdot \frac{k_S}{k_V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_V \cdot \tau_0}{k_S}} \right) \cdot e^{\left(\frac{k_V \cdot \tau_0}{k_S} \right)}}{\cos \alpha}. \quad (27)$$

Уравнение (27) показывает, что текущая толщина кольца по дну канавки при выхаживании зависит от толщины кольца по дну канавки на момент выключения рабочей подачи. Так же толщина кольца по дну канавки при выхаживании зависит от величины подачи шлифовального круга в момент ее выключения. Чем больше величина подачи, тем технологическая система оказывает большее сопротивление съему припуска при выхаживании. Время выхаживания оказывает непосредственное влияние на величину толщины кольца. Так же толщина кольца зависит от коэффициентов k_V и k_S , которые в свою очередь существенно зависят от условий шлифования.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что получена математическая модель связывающий толщину дорожки качения по дну канавки с основными технологическими факторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки: в 3 ч. Ч.2: Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов; под ред. С.Г. Редько. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1987. 154 с.
2. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. М: Машиностроение, 1982. 208 с.
3. Горбунов В. В. Технология врезного шлифования рабочих поверхностей колец подшипников в условия непрерывного контроля припуска / В. В. Горбунов // Чистовая обработка деталей машин: сб. ст. Саратов: СПИ, 1981. С. 129-132.

Решетникова Ольга Павловна – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Reshetnikova, Olga P. – postgraduate student of the Technology of Machine, Saratov State Technical University

Королев Альберт Викторович – профессор, д.т.н., заведующий кафедрой

Korolev Albert V. – PhD in Science, professor, head

УДК 621.623

О.П. Решетникова**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБА ТОРЦОВОГО ШЛИФОВАНИЯ ДОРОЖЕК КАЧЕНИЯ КОЛЕЦ УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ**

В статье рассматривается новая перспективная технология шлифования колец упорных подшипников торцом чашечного шлифовального круга. Приведены результаты проведенных экспериментальных исследований, описано влияние режимов обработки на геометрические параметры дорожек качения упорных подшипников.

Подшипник, геометрические параметры, шлифование

O.P. Reshetnikova**EXPERIMENTAL RESEARCH A FRONTAL METHOD OF GRINDING OF BEARING RINGS**

This article discusses a new perspective grinding technology of thrust bearing rings by end face of the cup-shaped grinding wheel. The results of experimental studies described the influence of processing modes on the geometrical parameters of the raceway thrust bearings.

Bearing, geometrical parameters, grinding

Весьма важным направлением в повышении качества опор трения качения является технологическое обеспечение рациональной геометрической формы из рабочих поверхностей, в частности дорожек качения. В настоящее время заданные размеры и форму упрочненных поверхностей деталей обеспечивают на операциях шлифования. При изготовлении колец подшипников значительная роль отводится операциям шлифования дорожек качения, на которых достигается требуемая точность дорожек, а, следовательно и подшипника в целом.

Особую сложность представляет собой шлифование торцевых фасонных поверхностей. Обычно при обработке таких поверхностей применяют процесс шлифования периферией шлифовального круга методом врезания [1, 2]. Методом врезания достигается более высокая геометрическая стабильность параметров профиля дорожки качения, более высокая геометрическая точность осевого биения дорожки качения. Однако этот метод не лишен серьезных недостатков: низкая степень самозатачивания шлифовального круга приводят к тому, что последний быстро «засаливается», поэтому требуется частая правка круга, в связи с чем наблюдается повышенный расход кругов и правящего инструмента. Неравномерный износ шлифовального круга из-за неравенства окружностей различных точек периферий круга.

На кафедре «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета разработана прогрессивная технология шлифования фасонных поверхно-

стей типа дорожек качения колец упорных подшипников торцом чашечного шлифовального круга (заявка на патент № 2012102205).

По сравнению с дисковым шлифовальным кругом чашечный круг имеет значительно больший размер рабочей поверхности, в результате чего снижается его износ и появляется возможность правки круга после обработки нескольких деталей. Шлифовальный круг работает длительное время без замены.

Для обеспечения заданных параметров качества дорожек качения колец упорного подшипника чашечным шлифовальным кругом важно определить рациональные режимы резания. Для определения этих режимов провели экспериментальные исследования процесса шлифования.

В качестве объекта исследований использовались кольца подшипников 1118-2902840-04. Подшипник предназначен для восприятия радиальных и осевых нагрузок в верхней опоре стойки передней подвески автомобилей семейства ВАЗ, моделей «Калина», «Приора» и «Гранта».

С целью проведения экспериментальных исследований процесса шлифования дорожек качения упорных подшипников был модернизирован станок модели ТПК-125М.

Шлифование дорожек качения упорных подшипников велось по следующей схеме (рис.1). Ось вращения кольца упорного подшипника 4 устанавливают под острым углом α к направлению подачи шлифовального круга 1, а ось шлифовального круга 1 устанавливают вдоль направления подачи S круга. Шлифовальный круг подвергают правке, в результате которой придают его рабочей поверхности тороидальную форму профиля 3, которая является зеркальным отражением формы профиля, которую требуется получить на обрабатываемой поверхности детали.

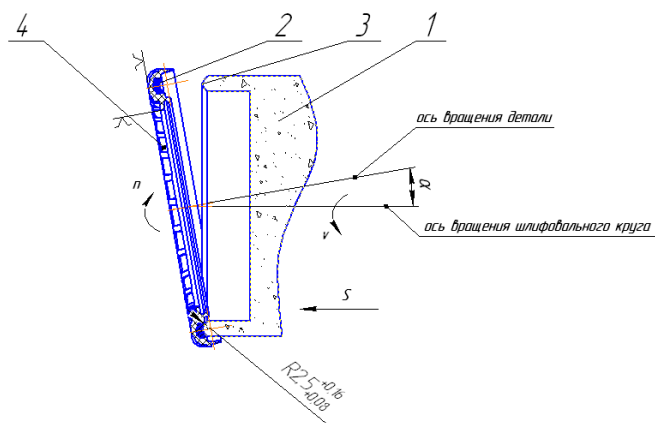


Рис. 1. Схема процесса шлифования дорожек качения упорных подшипников

В процессе шлифования деталь 4 и шлифовальный круг 1 вращают в противоположных направлениях, осуществляют быстрый подвод шлифовального круга к обрабатываемой поверхности, а затем осуществляют врезание рабочей поверхности круга в поверхность детали с рабочей подачей S , обеспечивающей заданный размер. После достижения заданного размера детали шлифовальный круг отводят в исходное положение.

Угол α устанавливают таким образом, чтобы каждая режущая кромка абразивного инструмента в процессе вращения шлифовального круга периодически входила и выходила из контакта с обрабатываемой поверхностью 2 детали 4. Это обеспечивает очистку рабочей поверхности инструмента от стружки, способствует отводу тепла из зоны обработки и повышению производительности обработки.

Так как ось вращения шлифовального круга установлена в направлении подачи, то износ круга не влияет на диаметр шлифуемой поверхности, что обеспечивает высокую точность обработки и возможность осуществления правки шлифовального круга после обработки нескольких деталей.

Ось шлифовального круга устанавливалась вдоль направления его подачи, а обраба-

тываемая деталь закреплялась в патрон бабки изделия под углом $\alpha = 5-8^\circ$ градусов к этому направлению. Выбор такого диапазона угла разворота оси детали обеспечивает, с одной стороны, хорошую очистку шлифовального круга от стружки и шлама, а с другой стороны, обеспечивает высокую точность формирования тороидального профиля детали, идентичную форме профиля рабочей поверхности шлифовального круга.

В качестве шлифовального круга использовался шашечный шлифовальный круг размером 82x72x20 мм на керамической связке 24А60МЗК7 производства австрийской фирмы «Атлантик». Обработку осуществляли за один рабочий ход. Фактически удаленный слой материала (припуск) составил 0,2 мм. Шлифование ведется с применением смазочно-охлаждающей жидкости 3% раствор НГЛ 205 в воде.

Для получения математической модели процесса шлифования дорожек качения упорных подшипников использовали метод полного факторного эксперимента 2^4 .

Регулируемыми количественными факторами являлись подача шлифовального круга S , время выхаживания шлифовального круга t , частота вращения заготовки n при обработке колец подшипников и окружная скорость шлифовального круга v .

За параметр оптимизации принята производительность процесса шлифования. Ограничительными факторами являлись радиус дорожки качения R , толщина колец подшипников по дну канавки h и момент сопротивления вращению M .

Для проверки критерия однородности дисперсии использовался критерий Кохрена, с уровнем значимости 0,05, значимость коэффициентов регрессии оценивалась по t_1 - критерию Стьюдента с уровнем значимости 0,05, оценка адекватности модели определялась по критерию Фишера с уровнем значимости 0,05.

В результате обработки экспериментальных исследований были получены математические модели, устанавливающие связи радиуса дорожки качения, толщины колец подшипников по дну канавки и момента сопротивления вращению с основными влияющими факторами: подачей шлифовального круга S , временем выхаживания шлифовального круга t , частотой вращения заготовки n при обработке колец подшипников и окружной скоростью шлифовального круга v . Математические зависимости имеют следующий вид:

$$R = 2,46 \cdot S^{-0,015} \cdot v^{0,022} \cdot t^{-0,057} \quad (1)$$

$$M = 18,28 \cdot S^{0,568} \cdot v^{-0,234} \cdot t^{0,107} \cdot n^{-0,24} \quad (2)$$

$$h = 3,353 \cdot S^{0,013 \cdot \ln(n) - 0,04} \cdot v^{-0,016 \cdot \ln(S) - 0,012} \cdot t^{0,003 + 0,005 \cdot \ln(S)} \cdot n^{0,015} \quad (3)$$

Как видно из равенства (1), подача шлифовального круга S , окружная скорость вращения шлифовального круга v и время выхаживания шлифовального круга t оказывают на радиус дорожки качения r_d непосредственное влияние. Параметр n – частота вращения заготовки, согласно расчетам, не оказывает влияние на радиус дорожки качения подшипника при шлифовании. Это объясняется тем, что частота вращения заготовки оказывает противоречивое влияние на процесс шлифования. С одной стороны, с увеличением частоты вращения шлифовального круга уменьшается глубина шлифования, что снижает износ шлифовального круга и влияние неравномерности припуска на погрешность профиля дорожки качения. С другой стороны, увеличивается длина пути врезания каждого абразивного зерна в обрабатываемую поверхность, что увеличивает вероятность его разрушения, а, следовательно, износа шлифовального круга. Такое противоречивое влияние частоты вращения шлифовального круга приводит к незначительному влиянию данного фактора на радиус дорожки качения. Согласно равенству (2), подача шлифовального круга S , окружная скорость вращения шлифовального круга v , частота вращения заготовки n и время выхаживания шлифовального круга t оказывают на момент сопротивления вращению M непосредственное влияние.

Как видно из равенства (3), время выхаживания шлифовального круга t и подача шлифовального круга S , частота вращения заготовки n и подача шлифовального круга S , окружная скорость вращения шлифовального круга v и подача шлифовального круга S оказывают на толщину подшипника h взаимное влияние.

На рис. 2 – 4 показано влияние на радиус дорожки качения подшипника исследуемых факторов. На каждом графике представлено влияние одного из факторов на верхнем, нижнем и промежуточных значениях прочих факторов. В подрисуночной подписи указаны размерности величин.

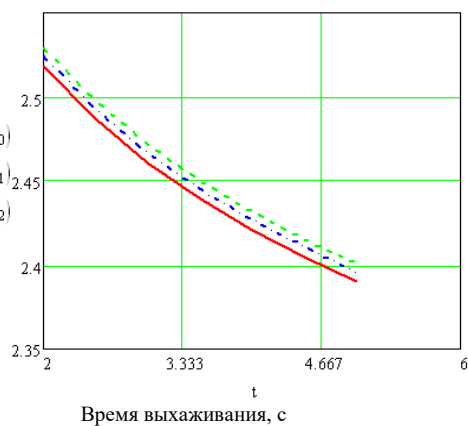
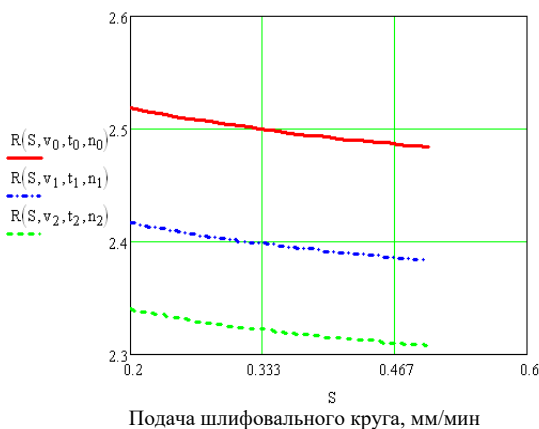


Рис. 2. Зависимость радиуса $R(S, v, t, n)$ (мм) дорожки качения подшипника от подачи шлифовального круга S (мм/мин) при максимальных, средних и минимальных значениях других факторов

Рис. 3. Зависимость радиуса $R(S, v, t, n)$ (мм) дорожки качения подшипника от времени выхаживания t (с) при максимальных, средних и минимальных значениях других факторов

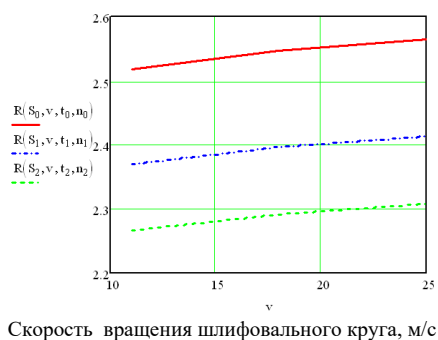


Рис. 4. Зависимость радиуса $R(S, v, t, n)$ (мм) дорожки качения подшипника от скорости вращения шлифовального круга v (м/с) при максимальных, средних и минимальных значениях других факторов

Как видно из рис. 2 с увеличением подачи шлифовального круга радиус дорожки качения уменьшается. Объясняется это тем, что при увеличении подачи нагрузка на зерна шлифовального круга возрастает, шлифовальный круг начинает интенсивнее изнашиваться по краям, что приводит к уменьшению радиуса дорожки качения. Неравномерный износ шлифовального круга вызван неравномерностью распределения припуска вдоль профиля дорожки качения. По краям профиля дорожки качения припуск больше, поэтому и износ шлифовального круга происходит более интенсивно по краю профиля дорожек.

Но наиболее значимым фактором является время выхаживания t . Из рис. 3 видно, что увеличение времени выхаживания шлифовального круга приводит к уменьшению радиуса дорожки качения подшипника. Такое значительное влияние времени выхаживания шлифовального круга на радиус дорожки качения объясняется тем, что при быстром отводе шлифовального круга радиус дорожки качения сохраняет свой размер, полученный в процессе шлифования. При длительном выхаживании же возникают дополнительные напряжения в металле в пределах упругих деформаций, которые при отводе шлифовального круга приводят к неравномерным деформациям кольца в виде уменьшения радиуса дорожки качения.

Такое же значительное влияние на радиус дорожки качения оказывает окружная скорость вращения шлифовального круга. Из рис. 4 видно, что увеличение скорости вращения шлифовального круга приводит к увеличению радиуса дорожки качения подшипника. Такое влияние скорости вращения шлифовального круга на радиус дорожки качения объясняется тем, что при увеличении скорости вращения шлифовального круга абразивные зерна испыты-

вают меньшую нагрузку. Кроме того, становится значительно меньше относительная разность скоростей резания по дну канавки и по ее краям. За счет этого шлифовальный инструмент меньше изнашивается по краям, а, следовательно, увеличивается радиус дорожки качения.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что:

1. Разработан новый перспективный способ шлифования дорожек качения упорных подшипников.
2. Спроектирована специальная экспериментальная установка для шлифования дорожек качения колец подшипников.
3. Разработана методика полного факторного эксперимента 2^4 , позволяющего провести исследования на двух уровнях исследуемых факторов и тем самым снизить трудоемкость экспериментальных исследований, а так же выявить влияние каждого из исследуемых факторов.
4. Статистическая обработка результатов исследований обеспечила возможность выявить искомые математические зависимости. Математические модели адекватны с 95% вероятностью.
5. На основе выполненных исследований выявлены оптимальные режимы шлифования: $S = 0,5 \text{ мм/мин}$, $t = 3,5 \text{ с}$, $n = 2000 \text{ об/мин}$; $v = 25 \text{ м/с}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки: в 3 ч. Ч.2: Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1987. 154 с.
2. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов/ А.К. Байкалов. Киев: Наукова думка, 1978. 207 с.

Решетникова Ольга Павловна – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Reshetnikova, Olga P. – postgraduate student of the Technology of Machine, Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДОРОЖКИ КАЧЕНИЯ
КОЛЬЦА ШАРИКОПОДШИПНИКА НА ОПЕРАЦИИ СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ
РАЗВЕРНУТЫМ БРУСКОМ**

В статье рассматривается формирование рациональной геометрии дорожек качения шарикоподшипников с многоточечным контактом на операции суперфиниширования.

Шарикоподшипники, суперфиниширование, долговечность, дорожка качения, устройство обработки, абразивные бруски

B.N. Salimov, T.A. Baltayev

**SIMULATION OF FORMING RACEWAYS OF BALL BEARINGS
FOR OPERATIONS SUPERFINISHING EXPAND ABRASIVE BAR**

The article considers the formation of rational geometry raceway bearings with multi-touch operation for superfinishing.

Ball bearings, super finishing, durability, semi ring race profile, processing device, abrasive bars

Важнейшим фактором, влияющим на долговечность дорожки качения кольца шарикоподшипника с многоточечным контактом, является ее оптимальная геометрическая форма. Достижение рациональной геометрической формы сложной поверхности дорожки качения без применения усовершенствованных устройств обработки крайне затруднительно.

Представители саратовской научной школы разработали формирование рациональной геометрии дорожек качения шарикоподшипников на операциях шлифования наклонным кругом [1], сформулировали основные понятия и определения в этой области, которые приняты в данной статье. Но процесс шлифования предназначен для предварительной обработки заготовок. Окончательная обработка дорожек качения подшипников осуществляется на операции суперфиниширования. Поэтому для суперфиниширования дорожки качения с рациональной геометрией, полученной на операции шлифования наклонным кругом, в данной работе предлагается способ суперфиниширования наклонным абразивным бруском [2].

В процессе суперфиниширования рабочая поверхность абразивных брусков и обрабатываемая поверхность прирабатываются друг к другу и приобретают соответствующую геометрическую форму. Определим геометрические параметры прирабатываемой поверхности и постепенно приобретает форму, соответствующую форме дорожки качения.

Схема рассматриваемого процесса суперфиниширования приведена на рис. 1. Как видно, заготовка 1 вращается вокруг своей оси, а к поверхности дорожки качения заготовки 1 с силой P прижимается абразивный брусок 2. Ось осцилляции бруска наклонена под углом α к оси заготовки. Рабочая поверхность абразивного бруска охватывает обрабатываемую поверхность заготовки и контактирует с ней по сложной кривой, расположенной вдоль рабочей поверхности бруска. Так как предварительная обработка дорожки качения осуществлялась наклонным шлифовальным кругом, имеющим тороидальную поверхность, то после приработки к обрабатываемой поверхности абразивный брусок тоже приобретет тороидальную форму. Тем самым в процессе суперфиниширования сохранится исходный

профиль дорожки качения и обеспечится равномерный сьем припуска вдоль профиля обрабатываемой поверхности.

Введем две декартовы системы координат $Oxyz$ и $Ox_b y_b z_b$. Обе системы имеют общее начало O , расположенное в точке пересечения осей симметрии заготовки 1. Ось OZ направлена вдоль оси вращения заготовки 1. Оси Oy и Oy_b проходят через центральную точку контакта абразивного бруска и обрабатываемой поверхности (рис. 1).

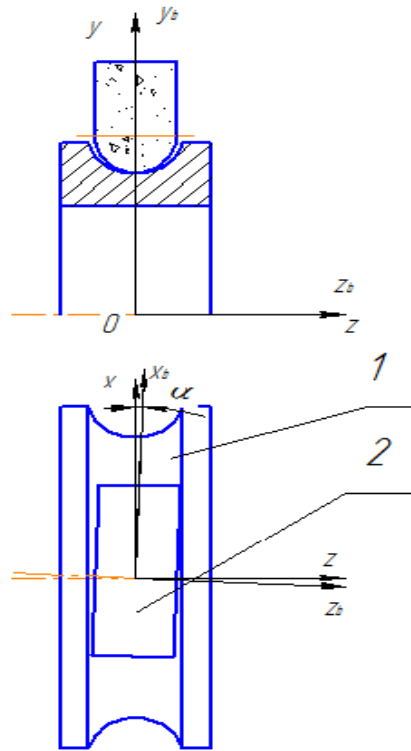


Рис. 1. Схема расположения заготовки – 1 и абразивного бруска – 2 в процессе суперфиниширования

Так как абразивный брусок приобретает тороидальную форму, то уравнение его тороидальной рабочей поверхности в параметрической форме будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} x_b(\delta, \psi) = (R_o + r - r \cdot \cos \delta) \cdot \cos \psi; \\ y_b(\delta, \psi) = (R_o + r - r \cdot \cos \delta) \cdot \sin \psi; \\ z_b(\delta, \psi) = r \cdot \sin \delta; \end{cases} \text{ при } \delta \leq \arccos \frac{r-h}{r} \text{ и } 0 \leq \psi \leq 2\pi, \quad (1)$$

где R_o – радиус дорожки качения по дну желоба, мм; r – радиус профиля абразивного бруска, мм; δ – полярный угол профиля абразивного бруска, град; ψ – полярный угол диаметрального сечения рабочей поверхности абразивного бруска, град; B – ширина абразивного бруска, мм; h – глубина дорожки качения, мм.

Из равенства (1) не сложно преобразовать уравнение к обычному виду.

Так как

$$\cos \psi = \sqrt{1 - \sin^2 \psi} = \sqrt{1 - \frac{y^2}{(R_o + r - r \cdot \cos \delta)^2}},$$

а

$$\cos \delta = \sqrt{1 - \frac{z^2}{r^2}},$$

то подставляя данные выражения в равенство (1), получим:

$$x = (Ro + r - r \cdot \sqrt{1 - \frac{z^2}{r^2}}) \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{(Ro + r - r \cdot \sqrt{1 - \frac{z^2}{r^2}})^2}}$$

После преобразований найдем:

$$x^2 + y^2 - (Ro + r)^2 + 2 \cdot (Ro + r) \cdot \sqrt{r^2 - z^2} - (r^2 - z^2) = 0. \quad (2)$$

Из равенства (2) несложно определить:

$$R_z = (Ro + r)^2 - 2 \cdot (Ro + r) \cdot \sqrt{r^2 - z^2} + (r^2 - z^2), \quad (3)$$

где R_z радиус диаметрального сечения дорожки качения при фиксированном значении Z .

Выразим уравнение рабочей поверхности абразивного бруска в системе координат $Oxyz$. Формулы перехода имеют вид:

$$\begin{aligned} x_b &= z \cdot \sin \alpha + x \cdot \cos \alpha; \\ y_b &= y; \\ z_b &= z \cdot \cos \alpha - x \cdot \sin \alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

Выразим уравнение рабочей части поверхности бруска, взяв во внимание, что рабочая поверхность бруска соответствует рабочей поверхности обрабатываемой поверхности, а в целом удовлетворяет условиям поверхности тора, имея ограничение по ширине B (рис. 2).

$$x_b^2 + y_b^2 - (Ro + r)^2 + 2 \cdot (Ro + r) \cdot \sqrt{r^2 - z_b^2} - (r^2 - z_b^2) = 0 \quad (5)$$

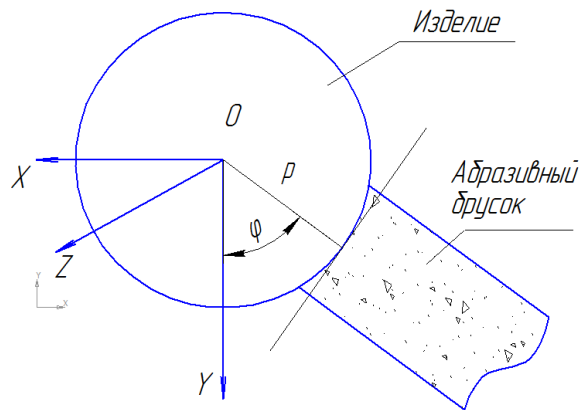


Рис. 2. Контакт абразивного бруска и изделия в сечении $z=const$

С учетом неравенств (4) и (5) уравнение поверхности бруска в системе $Oxyz$ после поворота на угол α будет иметь вид:

$$\begin{aligned} (x \cdot \cos \alpha + z \cdot \sin \alpha)^2 + y^2 - (Ro + r)^2 + 2 \cdot (Ro + r) \cdot \sqrt{r^2 - (z \cdot \cos \alpha - x \cdot \sin \alpha)^2} - \\ - (r^2 - (z \cdot \cos \alpha - x \cdot \sin \alpha)^2) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Зная уравнение рабочей поверхности бруска, определим координаты точек контакта бруска в каждом из сечений плоскостью XOY ($z=const$) с получаемой при обработке поверхностью.

Введем полярную систему координат:

$$\begin{cases} x = \rho \sin \varphi \\ y = \rho \cos \varphi \end{cases} \quad (7)$$

Тогда уравнение (6) с учетом равенств (7) перепишем следующим образом:

$$\begin{aligned} F = \rho^2 \cos^2 \varphi + (\rho \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha + z \cdot \sin \alpha)^2 - (Ro + r)^2 + \\ + 2 \cdot (Ro + r) \cdot \sqrt{r^2 - (z \cdot \cos \alpha - \rho \cdot \sin \varphi \cdot \sin \alpha)^2} - (r^2 - (z \cdot \cos \alpha - \rho \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha)^2) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

После преобразований уравнение примет вид:

$$F = \rho^2 (\sin^2 \varphi \cos^2 \alpha + \cos^2 \varphi \sin^2 \alpha) + 2z\rho(\sin \varphi \cos \alpha - \cos \varphi \sin \alpha) + \rho^2 \cos^2 \varphi + z^2 - (R_0 + r)^2 + 2 \cdot (R_0 + r) \cdot \sqrt{r^2 - (z \cdot \cos \alpha - \rho \cdot \sin \varphi \cdot \sin \alpha)^2} - r^2 = 0 \quad (9)$$

Поверхности касаются в точке, если они в этой точке имеют общую касательную. Определим величину угла φ , для которого величина ρ , из уравнения (9), будет минимальной, т.е. будет выполняться условие:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} = 0 \quad (10)$$

По теореме о дифференцировании неявных функций:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} = - \frac{\frac{\partial F}{\partial \varphi}}{\frac{\partial F}{\partial \rho}} \quad (11)$$

Из (10) и (11) можно записать:

$$\frac{\partial F}{\partial \varphi} = 0 \quad (12)$$

Дифференцируя (2.9) по φ , получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \varphi} = & \rho \cdot z(\cos \varphi \cos \alpha + \sin \varphi \sin \alpha) - \sin \varphi \cos \varphi \sin^2 \alpha (\rho^2 - 1) + \\ & + (R_0 + r) \frac{(z \cdot \cos \alpha - \rho \cdot \sin \varphi \cdot \sin \alpha) \cdot \rho \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha}{\sqrt{r^2 - (z \cdot \cos \alpha - \rho \cdot \sin \varphi \cdot \sin \alpha)^2}} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, запишем систему уравнений относительно ρ и φ :

$$(14)$$

Из системы (14) можно определить ρ и φ , а из (7) координаты точки (x, y) взаимодействия абразивного бруска с изделием в плоскости $z=const$ при заданных значениях R_0, r . Обрабатываемая деталь, проходя через точку (x, y) в заданном сечении z описывает окружность радиуса $\rho_z = \sqrt{x^2 + y^2}$. Таким образом точки (ρ_z, z) образуют профиль заготовки.

Уравнение профиля дорожки качения кольца шарикоподшипника, обработанного абразивными брусками, получено в неявном виде. Для определения его геометрических параметров использованы возможности программы MathCad.

Как видно технология обработки сложного профиля дорожки качения колец рассматриваемых шарикоподшипников требует особого контроля. Необходимо дальнейшее совершенствование суперфинишных операций в направлении повышения их технологических возможностей с применением современного оборудования и исследования механизма формообразования обрабатываемых поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королёв А.А. Математическое моделирование упругих тел сложной формы / А.А. Королев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2001. 128 с.
2. Патент № 2000916 (РФ) Способ обработки фасонных поверхностей вращения / А.А. Королев, А.В. Королев // Бюл. изобр. 1993. №37.
3. Патент № 2086389 (РФ) Устройство для чистовой обработки / А.В. Королев и др. // Бюл. изобр. 1997. № 22.

Салимов Бакытжан Нуржанович – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Salimov Bakytzhan Nurzhanovich – Saratov State Technical University, postgraduate student of «Mechanical

Engeneering»

Балтаев Тимур Асхатович –
магистрант кафедры «Технология
машиностроения» Саратовского
государственного технического
университета

Baltayev Timur Ashatovich –
Saratov State Technical University,
graduate student of «Mechanical
Engeneering»

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.43.01

Т.Н. Скоробогатова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ
НА УЧАСТКЕ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА МАЛОМОЩНОГО ДИЗЕЛЯ
МЕТОДОМ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

В статье приведен анализ моделирования нагруженного состояния коленчатого вала маломощного дизеля, разработана методика моделирования нагруженного состояния колена коленчатого вала дизеля, получены графики распределения напряжений от изгибающих моментов на участке коленчатого вала.

Каленчатый вал, концентрация напряжений, моделирование

T.N. Skorobogatova

**MODELLING OF CONCENTRATION OF PRESSURE
ON SITE OF THE CRANKED SHAFT OF THE LOW-POWER DIESEL ENGINE
THE METHOD OF SYSTEMS WITH THE DISTRIBUTED PARAMETERS**

In article the analysis of modelling of the loaded condition of a cranked shaft of a low-power diesel engine is resulted, the procedure of modelling of the loaded condition of a knee of a cranked shaft of a diesel engine is developed, charts of distribution of pressure from bending instants on a site of a cranked shaft are received.

The cranked shaft, modelling of concentration of pressure

Моделирование напряженных состояний шеек коленчатого вала сводится к решению дифференциальных уравнений в частных производных с помощью численных методов, при которых полученный результат соответствует действительному с заданной точностью, но требует много рутинных вычислений и, поэтому, выполним только при помощи вычислительной техники (ЭВМ) [3].

Системы, состояние которых описываются функциями нескольких аргументов, зависящих как от времени, так и от пространственных координат, получили название систем с распределенными параметрами (СПП). Состояние СПП описываются дифференциальными уравнениями в частных производных [1].

Коленчатый вал маломощного дизеля можно рассматривать как систему с распределенными параметрами, так как напряженное состояние вала (напряженность) зависит не

только от времени, но и от пространственных координат. Поэтому расчет шейки коленчатого вала можно произвести методом СРП.

Большинство разрушений на шейках коленчатого вала возникают из-за колебаний (вибрации) вала, так как уровень колебаний коленчатого вала очень высок [2]. Диаграмма уровней вибрации основных источников дизелей представлена на рисунке 1. Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданиях» обозначают допустимый уровень вибрации до 107 дБ. Так как вибрация дизельного двигателя (110 дБ) превышает норму, то целесообразно предположить, что основные разрушения коленчатого вала маломощного дизеля происходят именно из-за вибрации.

Так как колебания (вибрация) распространяются по всему коленчатому валу, то возможно использовать уравнения колебания вала (стержня), а для его частей, лишь изменить граничные условия.

Скорость вращения вала, регулируется изменением давления внутри цилиндра. Так как скорость вращения вала, а вместе с ним и скорость изменения давления на поршень не постоянны, то силой, создающей вибрацию, является ускорение изменение давления.

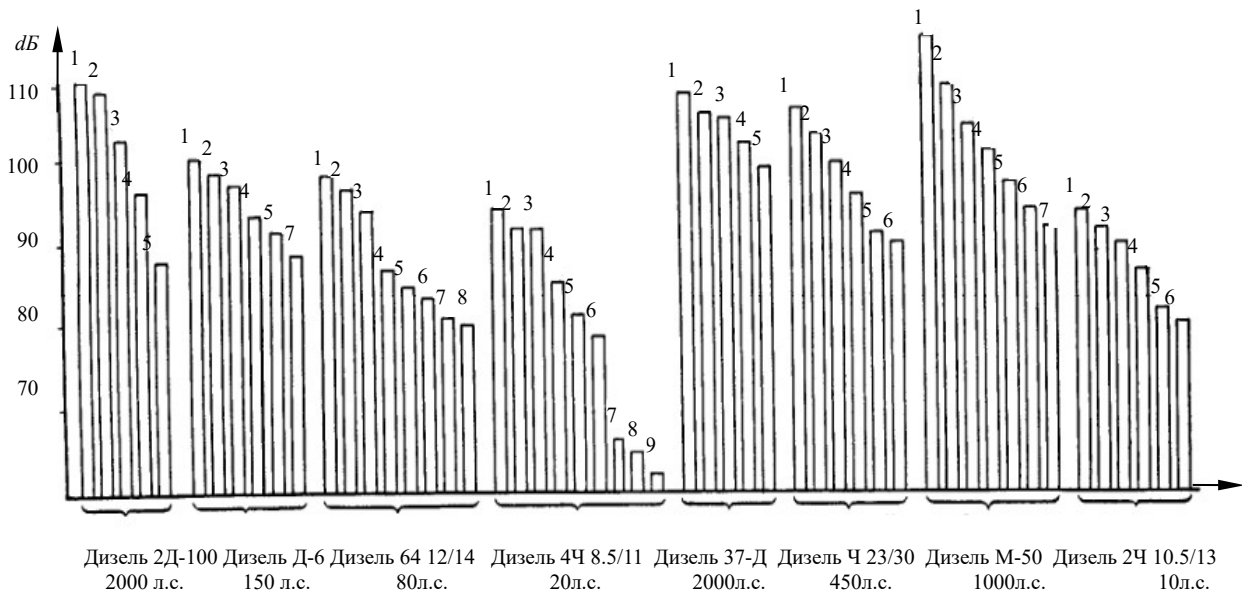


Рис. 1. Диаграмма уровней вибрации основных источников дизелей параметрам коленчатого вала и условиям работоспособности системы
 1 – дизель; 2 – воздуходувка; 3 – шатунно-поршневая группа; 4 – процесс сгорания;
 5 – топливный насос; 6 – впуск; 7 – клапанный механизм; 8 – масляный насос;
 9 – процесс сгорания и шатунно-поршневая группа

Давление, действующее на поршень, через индикаторную мощность дизеля определяется выражением:

$$p = \frac{N \cdot 30 \cdot i}{V \cdot n \cdot z},$$

где N – индикаторная мощность, Вт; p – индикаторное давление, МПа; V – рабочий объем дизеля, л; n – частота вращения коленчатого вала, об/мин; z – число цилиндров; i – коэффициент тактности.

Подобрано уравнение для шейки коленчатого вала, зависящее не только от координаты x (длины шейки), но и от координаты y (диаметра шейки).

$$\frac{\partial Q(x,y,t)}{\partial t^2} - a^2 \cdot \left[\frac{\partial^2 Q(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q(x,y,t)}{\partial y^2} \right] = f(x,y,t), \quad (1)$$

где $Q(x,y,t)$ – это напряженность в отдельно взятой точке рассматриваемой шейки коленчатого вала, Па; x, y – координаты точки, мм; t – время, с; a – скорость вращения коленчатого вала, мм/с; $f(x,y,t)$ – внешнее воздействие, Па/с² [1]

Внешнее возмущающее воздействие $f(x,y,t)$ – ускорение изменения давления имеет следующий вид:

$$f(x,y,t) = \frac{p}{t^2} = \frac{N \cdot 30 \cdot i}{V \cdot n \cdot z \cdot t^2}.$$

Уравнению (1), подобранному из справочника [1], соответствуют начальные и граничные условия, а так же стандартизирующая функция и функция Грина.

$$\begin{cases} Q(x,y,0) = Q_0(x,y); \\ \frac{\partial Q}{\partial t}(x,y,0) = Q_1(x,y). \end{cases} \text{ – начальные условия,} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Q(0,y,t) = g_1(y,t); \\ \frac{\partial Q}{\partial x}(l_1,y,t) = g_2(y,t); \\ Q(x,0,t) = g_3(x,t); \\ \frac{\partial Q}{\partial x}(x,l_2,t) = g_4(x,t). \end{cases} \text{ – граничные условия,} \quad (3)$$

$$a > 0; 0 \leq x \leq l_1; 0 \leq y \leq l_2 \quad t \geq 0,$$

Стандартизирующая функция:

$$\omega(x,y,t) = f(x,y,t) + Q_0(x,y) \cdot \delta'(t) + Q_1(x,y) \cdot \delta(t) - a^2 \cdot \delta'(x) \cdot g_1(y,t) + a^2 \cdot \delta(l_1 - x) \cdot g_2(y,t) - a^2 \cdot \delta'(y) \cdot g_3(x,t) + a^2 \cdot \delta(l_2 - y) \cdot g_4(x,t), \quad (4)$$

Функция Грина:

$$G(x,y,\xi,\eta,t) = \frac{4}{l_1 \cdot l_2} \sum_{m,n=0}^{\infty} \varphi_{mn}(x,y) \cdot \varphi_{mn}(\xi,\eta) \cdot \sin\left(\frac{a \cdot \pi}{2} S_{mn} \cdot t\right) \cdot \frac{1}{\frac{a \cdot \pi}{2} \cdot \sqrt{S_m^2 + S_n^2}}$$

где $\varphi_{mn}(x,y) = \varphi_{mn}(\xi,\eta) = \sin(S_m \cdot x) \cdot \sin(S_n \cdot y)$; $S_m = (2m+1) \frac{\pi}{l_1}$, $S_n = (2n+1) \frac{\pi}{l_2}$, $S_{mn} = \sqrt{S_m^2 + S_n^2}$; $m, n=0,1,2,\dots$ ξ, η – координаты точки приложения напряженности; x, y – координаты рассматриваемой точки, мм.

Выходная величина напряженности $Q(x,y,t)$ находится как пространственно временная композиция от произведения функции Грина $G(x,y,\xi,\eta,t)$ на стандартизирующую функцию $\omega(x,y,t)$:

Для стали 45ХА с учетом вида обработки шейки, начальные условия равны:

$$Q(x,y,t) = \int_0^l \int_0^l \int_0^t G(x,y,\xi,\eta,t) \cdot \omega(\xi,\eta,\tau) d\tau d\eta d\xi,$$

$$Q(x,y,0) = Q_0(x,y) = 180 \cdot 10^6 \text{ Па}; \frac{\partial Q}{\partial t}(x,y,0) = Q_1(x,y) = 220 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

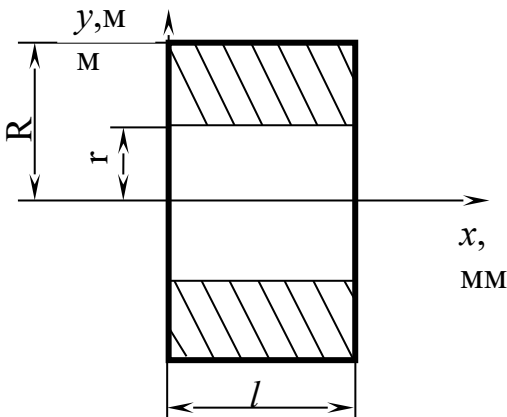


Рис.2. Шатунная шейка коленчатого вала

Граничные условия для шатунной шейки коленчатого вала приняты с учетом расчетной схемы в виде стержня с двухсторонней заделкой, поэтому граничные условия имеют нулевые значения.

$$Q(0,y,t) = g_1(y,t) = 0; \frac{\partial Q}{\partial x}(l,y,t) = g_2(y,t) = 0$$

$$Q(x,0,t) = g_3(x,t) = 0; \frac{\partial Q}{\partial x}(x,0,t) = g_4(x,t) = 0$$

Остальные граничные условия с учетом рисунка 2 примут следующий вид:

$$a > 0; 137 \leq l \leq 179 \text{ мм}; 0 \leq R \leq 33 \text{ мм}, 0 \leq r \leq 16 \text{ мм}; t \geq 0.$$

что соответствует параметрам коленчатого вала и

условиям работоспособности системы.

Получена характеристика напряженности. Для этого найдена зависимость напряженности от координат и от времени, а затем, построены графики (рис.3).

Расчет концентрации нагрузок шеек коленчатого вала производился в декартовой системе координат по осям x, y. Рассмотрено распределение напряженности в шатунной шейке после 8 часов и 24 часов непрерывной работы.

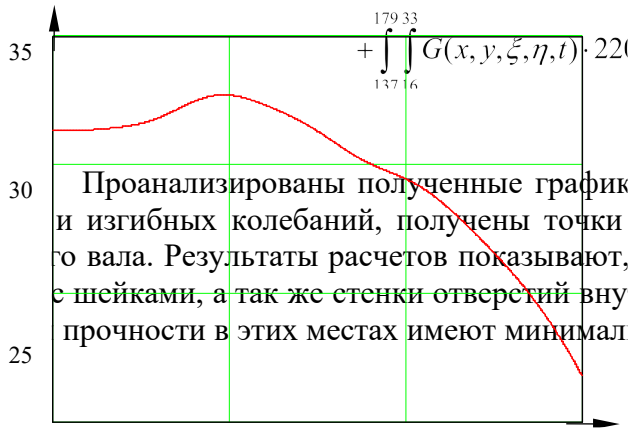
В результате полученных расчетов построены графики распределения напряженности от изгибных колебаний по радиусу и длине шатунной шейки через 8 часов и 24 часа непрерывной работы (рис. 3), построены графики распределения напряженности от изгибных колебаний по радиусу и длине коренной шейки.

$$Q'(x,y,t) = \int_{137}^{179} \int_{16}^{33} \int_0^t G(x,y,\xi,\eta,t) \cdot \omega(\xi,\eta,\tau) d\tau d\eta d\xi =$$

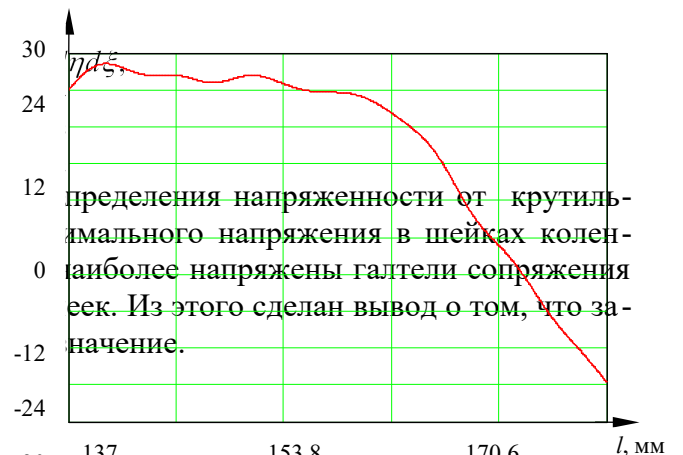
$$= \int_{137}^{179} \int_{16}^{33} \int_0^t G(x,y,\xi,\eta,t) \cdot (f(x,y,t) + 180 \cdot 10^6 \cdot \delta'(t) + 220 \cdot 10^6 \cdot \delta(t)) d\tau d\eta d\xi =$$

$$= \int_{137}^{179} \int_{16}^{33} \int_0^t G(x,y,\xi,\eta,t) \cdot \left(\frac{P}{\tau^2} \right) d\tau d\eta d\xi + \int_0^t \int_{16}^{33} \frac{d}{dt} G(x,y,\xi,\eta,t) \cdot 180 \cdot 10^6 d\eta d\xi +$$

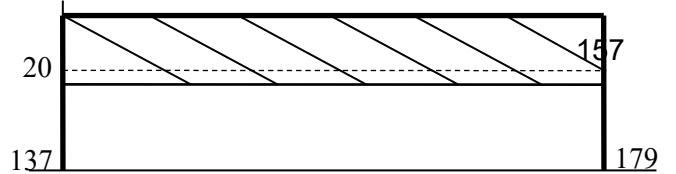
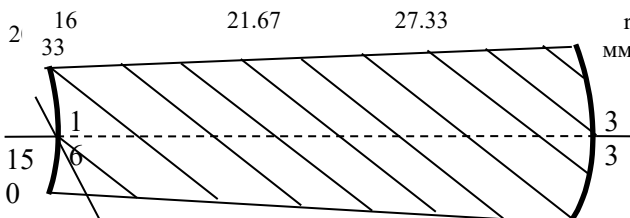
Q(Δr), кг/мм²



Проанализированы полученные график и изгибных колебаний, получены точки го вала. Результаты расчетов показывают, е шейками, а так же стенки отверстий вну прочности в этих местах имеют минимал



деления напряженности от крутиль- амального напряжения в шейках колен- наиболее напряжены галтели сопряжения еек. Из этого сделан вывод о том, что за- значение.



$a - l = 150\text{мм}$; $b - \Delta r = 20\text{мм}$.

Рис. 3. Графики распределения напряженности от изгибных колебаний по шатунной шейке после $t = 8$ часов (28800с.)

Из рис. 4 видно, что основное напряжение приходится на галтели (места крепления шейки со щекой) и на стенке отверстия в шейке. Существенными также являются напряжения на поверхностях шеек, возникающие при кручении.

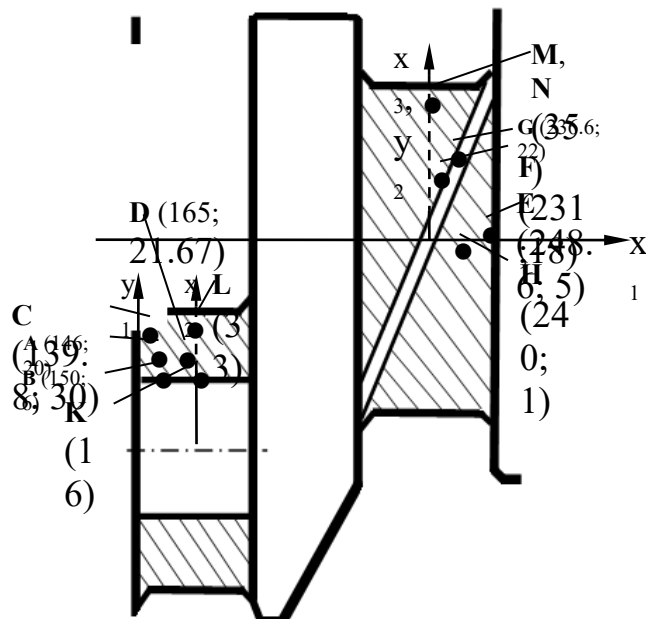


Рис. 4. Точки максимального напряжения на шейках коленчатого вала после 8 и 24 часов непрерывной работы

x_1, y_1 – система координат для расчета изгибных колебаний шатунной шейки;
 x_1, y_2 – система координат для расчета изгибных колебаний коренной шейки;
 x_2 – ось координат для расчета крутильных колебаний шатунной шейки; x_3 – ось координат для расчета крутильных колебаний коренной шейки

Из анализа поломок коленчатых валов известно, что большей частью изломы связаны с усталостью из-за многочисленных циклов пуска дизеля. Разрушение начинается от зон наибольших концентраций напряжений.

Таким образом, возникает необходимость в моделирование концентрации нагрузок в коленчатом валу дизельных двигателей для исключения поломок.

Прочность коленчатых валов может быть повышена оптимизацией геометрии элементов колена с улучшением распределения напряжений в сечениях вала, а также применением материалов и способов обработки, способствующих повышению предела выносливости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. М.: Наука, 1979. 224 с.
2. Верховский А.В. Определение напряжений в опасных сечениях деталей сложной формы / А.В. Верховский. М.: Машгиз, 1958. 248 с.
3. Гоц А. Н. Научные основы расчета и ускоренных испытаний деталей кривошипно-шатунного механизма тракторных дизелей на стадии проектирования: дис. канд. техн. наук / Владимир, 2004. 290 с.

Скоробогатова Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление и информатика в технических системах» БИТТУ Саратовского государственного технического университета

Skorobogatova Tatyana Nikolaevna – Cand.Tech.Sci., managing faculty «Management and computer science in technical systems» BITTU Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.43

К.Л. Слитников, И.М. Попова, И.К. Данилов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-РЕМОНТНЫХ ЦИКЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ (ДВС)

Разработаны новые подходы к эксплуатационно-ремонтному циклу отечественных автомобильных ДВС с применением мобильных средств диагностирования. На основе проведенных исследований предложено устройство диагностики двигателей внутреннего сгорания. Обоснован критерий оптимальности ремонта на конкретной выборке ДВС с конкретным расчетом удельных трудоемкостей и предлагаемыми слагаемыми удельных затрат.

Эксплуатационно-ремонтный цикл, предварительный ремонт, капитальный ремонт, трудоемкость, доля восстановления

K.L. Slitnikov, I.M. Popova, I.K. Danilov

IMPROVING THE PLANNING OF THE OPERATION AND MAINTENANCE CYCLES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES (ICE)

New approaches to the maintenance and repair cycle of domestic automobile internal combustion engine with application of mobile diagnostic tools were developed in this article. On the basis of the conducted research the proposed device diagnostics of internal combustion engines. The criterion of optimality of

the repairs on the particular sample of internal combustion engine with specific calculation of unit labour inputs and proposed elements of the unit cost was justified.

Maintenance and repair cycle, preliminary repairs, overhaul, the complexity, the share of the recovery

На автомобильном транспорте сложилась тенденция старения парка автомобилей, объясняемая состоянием экономики страны. Затраты на поддержание работоспособности автомобилей превышают стоимость новых, достигают 20...25% себестоимости перевозок, до 40% из которых приходится на технические обслуживания (ТО) и ремонты двигателей. При этом базовые детали двигателей попадают в капитальный ремонт (КР) или в утилизацию с недоиспользованным на 35...45% ресурсом, что обусловлено несовершенством подхода к эксплуатационно-ремонтному циклу (ЭРЦ) ДВС как к системе.

Многими авторами предлагаются схемы ЭРЦ, жестко регламентирующие через определенный пробег детерминированный состав восстановительных работ – предупредительные и капитальные ремонты. Хотя большинство мировых производителей отказываются от проведения КР или проводят его один раз за весь срок службы. Из-за отсутствия нормативов по составу восстановительных работ, трудоемкости и уравнительного подхода при ремонте не учитывается индивидуальное состояние ДВС, теряются резервы повышения эффективности ДВС. Необходима разработка новых подходов к ЭРЦ отечественных автомобильных ДВС с широким применением мобильных средств диагностирования. Нами исследовались 43 двигателя КамАЗ, которым по результатам диагностирования выполнялись только ПР, и 37 двигателей, которым проводился ПР и один КР. Приведем изменение суммарных удельных затрат на восстановление работоспособности только проведением ПР (табл. 1).

Таблица 1

Суммарные удельные затраты проведением ПР

Пробег, тыс.км.	120	180	240	300	360	420	480
Порядковый номер и вид ремонта	1ПР	2ПР	3ПР	4ПР	5ПР	6ПР	7ПР
Удельные затраты перед ремонтом, руб/тыс.км.	15,5	12	11	10	9	9	9
Удельные затраты после ремонта, руб/тыс. км.	17,5	13	13	11	11	19	11

Обеспечение работоспособности проведением ПР и одного КР увеличит затраты на поддержание ДВС в работоспособном состоянии в полтора раза. Оценка затрат по 37 ДВС КамАЗ показало следующее распределение суммарных удельных затрат (табл. 2).

Таблица 2

Суммарные удельные затраты проведением ПР и КР

Пробег, тыс.км.	120	180	240	300	360	450
Порядковый номер и вид ремонта	1ПР	2ПР	3ПР	4ПР	КР	5ПР
Удельные затраты перед ремонтом, руб/тыс.км.	15,5	12	11	10	9	11
Удельные затраты после ремонта, руб/тыс. км.	17,5	13	12	11	14	12

И в первом, и во втором случае решение о виде ремонта, его объеме и трудоемкости принимается по результатам предремонтного диагностирования.

В первую очередь диагностируется цилиндропоршневая группа, так как на ее долю приходится большее количество неисправностей. Нами предложено устройство для оценки

температуры камеры сгорания без воспламенения, как дополнительный параметр наряду с измерениями компрессии в цилиндрах ДВС. Рабочая гипотеза заключается в том, что температура снижается при ухудшении компрессионных свойств поршневых колец из-за прорыва газов в картер ДВС. В 2010 году был получен патент на полезную модель (№95827) устройства диагностики ДВС (рис. 1). Диагностика других систем и механизмов проводится имеющимся штатным оборудованием.

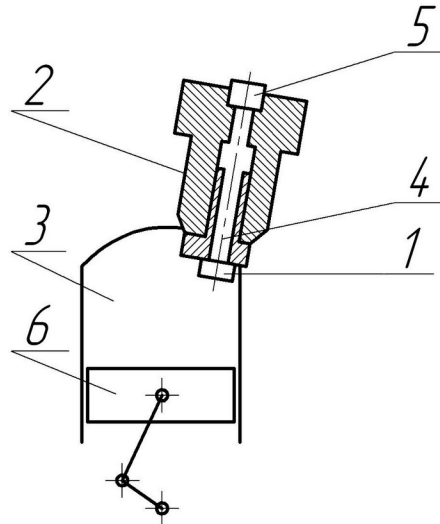


Рис.1. Устройство диагностики ДВС: 1- термопара; 2 – корпус; 3 – камера сгорания; 4 – канал; 5 – блок регистрации; 6 – поршень

Суммарные удельные затраты путем ПР и КР по результатам диагностирования свидетельствуют о целесообразности проведения предупредительных ремонтов. Этот вывод основывается на расчете по предлагаемой формуле критерия (1) оптимальности ремонта. При расчете учитывались стоимости ремонта, устранения отказа, потери прибыли из-за преждевременной замены деталей (недоиспользование ресурса). Формула для расчета выглядит следующим образом:

$$C_{y\partial} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{pi} + C_{oi}}{\tau_i} \right) + \frac{t_{np} \cdot C_{np}}{\tau_{max}} + \sum \frac{C'_{npi}}{\tau'_{max} - \tau'_i} \rightarrow \min \quad (1)$$

где C_{pi}, C_{oi}, C'_{npi} – суммарные стоимости ремонта, устранения отказа, потерь прибыли или дохода, приносимого двигателем при недоиспользовании ресурса, руб.; n – число сменных комплектов в двигателе; τ_i, τ_{max} – межремонтный пробег i -го, имеющего наибольшую наработку комплекта; t_{np} – суммарное время простоя по техническим причинам, ч; C_{np} – средняя стоимость простоя, руб.

Таким образом, обоснован критерий оптимальности ремонта на конкретной выборке ДВС с конкретным расчетом удельных трудоемкостей и предлагаемыми слагаемыми удельных затрат.

Для системного планирования технических воздействий за весь срок службы ДВС нами использовалась теория многоуровневых иерархических систем (МИС), предполагающая возможность описать математически процесс создания ЭРЦ на организационных уровнях (стратах), разрабатывать схемы эксплуатационно-ремонтных циклов [1]. По результатам диагностирования с учетом средних значений показателей технического состояния перед ПР и КР определяется набор восстановительных работ, их состав, средства промежуточного контроля. Итогом является формирование и определение комплекса восстановительных работ по механизмам и системам ДВС. При этом восстановление механизмов и систем можно рассматривать как последовательный процесс, трудоемкости всех операций суммируются. Но необходимо учитывать возмож-

ность параллельности процесса восстановления по системам и механизмам агрегатов, которые можно выполнять одновременно. Тогда трудоемкость восстановления можно планировать не суммированием трудоемкостей отдельных операций, а несколько меньшей трудоемкостью, обусловленной параллельностью процесса восстановления ДВС (любого агрегата). Хронометраж восстановления 38 ДВС по предлагаемой схеме в Саратовском автоцентре КамАЗ показал, что при восстановлении с участием двух и более единиц оборудования и обслуживающего персонала, трудоемкость восстановления двигателей трех групп: «новых» (15 единиц), после ПР (12 единиц), после КР (11 единиц), в любой момент времени можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью с высоким коэффициентом корреляции (рис. 2).

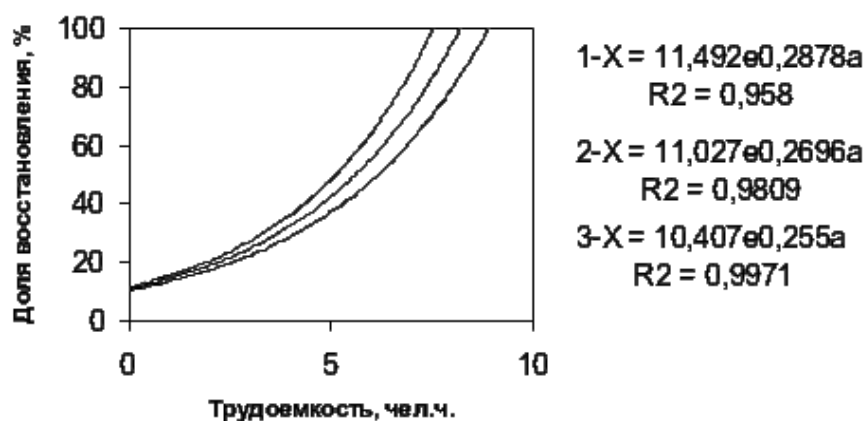


Рис. 2. Зависимость доли восстановления от трудоемкости:
1 – ДВС «новые»; 2 – ДВС после ПР; 3 – ДВС после КР

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов И.К. Моделирование ремонтных циклов ДВС и оценка их трудоемкости сетевыми методами / И.К. Данилов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 2 (3). С. 61-66.

Слитников Константин Леонидович – аспирант кафедры «Автомобили и двигатели» Саратовского государственного технического университета

Попова Ирина Михайловна – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте» Саратовского государственного технического университета

Данилов Игорь Кеворкович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили и двигатели» Саратовского государственного технического университета

Slitnikov Konstantin Leonidovich – post-graduate student of the Department «Cars and motors» Saratov state technical University

Popova Irina Mihailovna – candidate of economic sciences, associate professor the Department «Organization of transportations and management of transport» Saratov state technical University

Danilov Igor Kevorkovich – doctor of technical sciences, professor the Department «Cars and motors» Saratov state technical University

УДК 621.

С.А. Черкасова, В.Е. Боровских

**ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ
И ИХ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОРПУСАХ АВТОМОБИЛЕЙ**

Обзор полимерных материалов используемых в автомобилестроении. Рассмотрены влияния кузова специального автобуса выполненного с использованием композиционных материалов на напряжённно-деформированные состояния каркаса.

Полимерные материалы, стеклопластик, напряжённно-деформированное состояние, автобус

S.A. Cherkasova, V.E. Borovskih

**POLYMERIC MATERIALS IN MECHANICAL ENGINEERING AND THEIR
EXPERIENCE OF USE IN CASES OF CARS**

The review of polymeric materials used in automotive industry. Influences of a body of the special bus executed with use of composite materials on intense the deformed conditions of a framework are considered.

Polymeric materials, fibreglass, intense the deformed condition, the bus

Анализируя классификацию полимерных материалов, отмечаем, что подавляющее большинство пластиков конструкционного назначения относятся к числу композиционных материалов. Их свойства определяются составом полимерного связующего, типом наполнителя и структурой пограничных слоёв, ответственных за перераспределение внешних воздействий от матрицы к частицам наполнителя.

По составу, структуре и физико-механическим свойствам большинство композиционных материалов можно подразделить на три основные группы: изотропные, трансверсально-изотропные и ортотропные материалы.

К изотропной группе композиционных материалов относят материалы, для армирования которых используют наполнитель в виде рубленых коротких волокон, соизмеримых с диаметром, сплошных и полых сфер и микросфер, порошков и других мелкодисперсных компонентов. Этот компонент хаотично перемешан со связующей матрицей. Напряжённно-деформированное состояние такого материала аналогично однородному изотропному материалу. В качестве связующей матрицы применяют термореактивные и термопластичные полимеры, а также металлы, обладающие высокими адгезионными свойствами к наполнителю. Применяют изотропные композиционные материалы в электромашиностроении, в радиотехнике и электронике.

К группе трансверсально-изотропных композиционных материалов относят материалы, физико-механические свойства которых изотропны в плоскости листа и анизотропны по толщине. Напряжённно-деформированное состояние трансверсально-изотропной среды описывается пятью упругими постоянными. В изотропном слое армирующим веществом могут быть пленки (стеклянные, полимерные, металлические), рубленые волокна, уложенные хаотически, пропитанная бумага, стекломат. А в анизотропном слое в качестве армирующего наполнителя используют шпон (древесный, стеклянный, из металлических волокон, который

представляет собой слой однонаправленных армирующих элементов связанных между собой), тканевые материалы (сатинового, полотняного переплетения и другие) на основе стеклянных, хлопчатобумажных и полимерных волокон. Широкое применение эти материалы получили в машиностроении, судостроении, электро- и радиотехнике в частности, такие как стекловолоконистые анизотропные материалы АГ-4В, ДСВ-2Р-2М, СВМ «звёздной» структуры и другие. Трансверсально-изотропные композиционные материалы применяют для изготовления многослойных печатных плат и микроэлектронных устройств, т.е. из них изготавливают плоские панели, а также зубчатые колёса и шпонки.

К ортотропной группе композиционных материалов относят материалы, которые имеют три взаимно перпендикулярные оси упругой симметрии. Напряжённо-деформированное состояние ортотропной среды определяется девятью упругими постоянными. Характерной особенностью этих материалов являются их высокие удельные физико-механические свойства в заданных направлениях. Из них изготавливают корпусные конструкции, трубы, оболочки, резервуары, гребные винты различные профильные элементы. Они получили наибольшее применение при проектировании ответственных несущих элементов конструкций.

Приведённые в таблице 1 значения удельной прочности различных материалов хорошо иллюстрируют одно из преимуществ использования композиционных материалов на основе термопластов.

Таблица 1

Удельная прочность различных материалов

Материал	Относительная удельная прочность
Ненаполненные термопласты:	
поликарбонат	1,0
полистирол	1,09
полиамид	1,24
сополимер стирола и акрилонитрила	1,48
Бронза (жёлтая литевая)	1,52
Сплавы цинка (литевые)	1,67
Наполненные стеклянным волокном термопласты:	
полистирол	1,71
поликарбонат	1,76
сополимер стирола и акрилонитрила	1,95
полиамид	2,62
Магний	2,19
Алюминий	2,52

К наиболее применяемым композиционным пластикам, предназначенным для изготовления высоконагруженных изделий, относятся анизотропные материалы, такие как стекловолоконистые пластики, в которых упрочняющим наполнителем является стеклянное волокно.

В автомобилестроении стеклопластик - самый популярный материал. Началом истории его считаются 40-е годы прошлого века. Первое применение стеклопластику было найдено в строительстве лодок. Главным преимуществом пластиков перед другими материалами, в частности металлами, является относительная лёгкость получения из них изделий различной конфигурации без механической обработки, с пониженным количеством отходов. Деталь из стеклопластика склеивают в форме, что резко сокращает трудовые и материальные затраты в производстве. Стеклопластики - достаточно универсальный материал. Среди синтетических материалов они занимают важное место, так как они имеют высокую прочность при малом собственном весе, что значительно снижает издержки по транспортировке, погру-

зочно-разгрузочным операциям и монтажным работам. У пластика на основе стеклоткани высокая атмосферостойкость, химостойкость, неподверженность коррозии и гниению, стойкость к разложению и механическому износу, а также они обладают высокой долговечностью и надёжностью в эксплуатации при t° от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$. Из стеклопластиков можно простыми средствами изготавливать даже кузовные детали сложной конфигурации.

Никто не верил, что стеклопластик надежен, однако, время показало обратное. Были прецеденты, когда при столкновении автомобиля с кузовом, изготовленным из стеклопластика, и обычного «стандартного» авто результат был не в пользу последних, железному автомобилю доставалось гораздо сильнее. Так что прочность и надёжность стеклопластика доказана временем, однако, нигде в публикациях нет ни теоретических, ни экспериментальных данных о напряжённо-деформированном состоянии конструкции автомобиля, корпус которого выполнен из стеклопластика.

Поэтому при проектировании специального автобуса для перевозки инвалидов в колясках были созданы две расчётные схемы: Первый вариант схемы состоял из каркаса, выполненного в виде балочных элементов, и обшивки кузова, состоящей из пластин и оболочек. Второй вариант схемы включал в себя каркас из балочных элементов, обшивку кузова и стёкла автобуса, которые выполнены в виде пластин и оболочек, но обшивку крыши в автомобиле заменили со стальных с двухсторонней оцинковкой пластин на пластины из конструкционного стекловолокнистого материала АГ-4-С.

Для проектирования модели конструкции автобуса был использован пакет прикладных программ «ИСКРА» предназначенный для решения линейных задач. «ИСКРА» – это не отдельная программа, а интерактивная система конечно-элементарных полностью совместимых программ для формирования, нагружения, расчёта деталей конструкции и анализа результатов. При создании модели использовались дискретные конечные элементы, которые образовывали сетку, покрывающую всю модель. Оптимальным распределением нагрузок на оси, как в рабочем, так и в снаряжённом состоянии является 60/40% (передняя и задняя оси). Распределяя нагрузку по всему салону автомобиля, и сосредотачивая её в узлах конструкции, учитывали что, чем дальше узел находится от непосредственного приложения веса пассажиров, тем меньше он испытывает нагрузки. В результате были получены картины напряжённого состояния элементов конструкции расчётных моделей с металлической обшивкой и стеклопластиковой обшивкой, представленные на рис. 1 и 2.

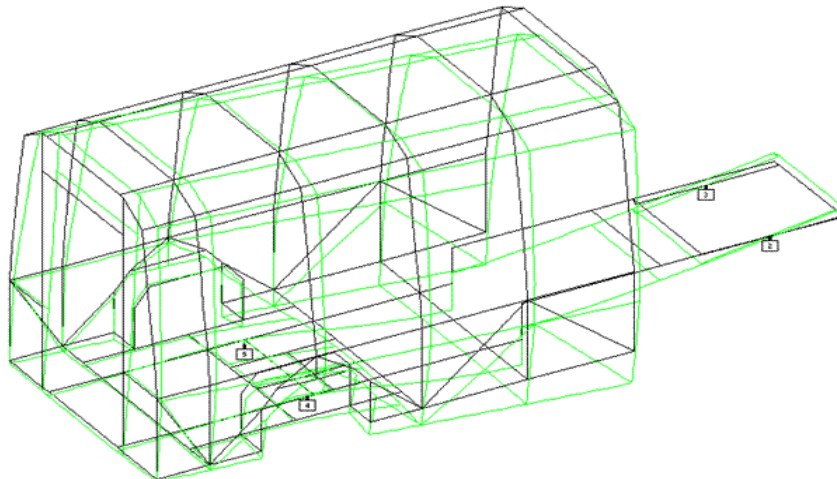


Рис. 1. Картина деформированного состояние элементов каркаса с обшивкой, выполненной из стальных с двухсторонней оцинковкой пластин при нагрузке $F_{\text{испыт}}=10000\text{ Н}$

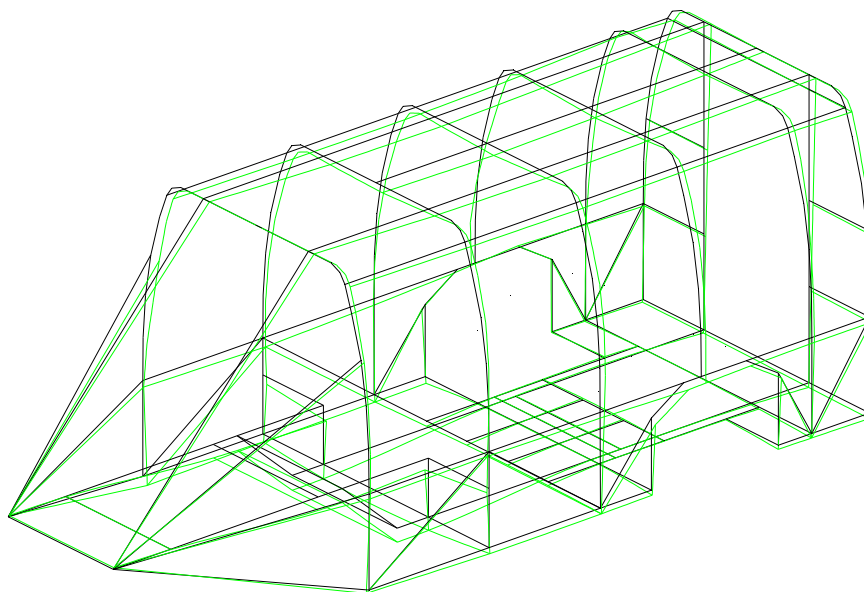


Рис.2. Картина деформированного состояние элементов каркаса с обшивкой, выполненной из конструкционного стекловолоконного материала АГ-4-С при нагрузке $F_{испыт}=10000$ Н

Выводы:

1. По анализу численного эксперимента напряженно-деформированного состояния обшивки обоих вариантов дает основание сделать вывод о различной картине возникающих деформаций в каркасе при различных материалах обшивки.
2. По результатам исследований было установлено, что использование стеклопластика позволяет снизить деформацию в каркасе автомобиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов А.И. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов / А.И. Потапов, Ф.П. Пеккер. Л.: Машиностроение, 1977. 192 с.
2. Папков С.П. Полимерные волокнистые материалы / С.П. Папков. М.: Химия, 1986. 224 с.
3. <http://rusautomaster.narod.ru/stekloplastik.html>
4. <http://www.autoshcool.ru/1238-texnologiya-izgotovleniya-stekloplastika-dlya-tyuninga-svoimi-rukami.html>
5. Промышленные полимерные композиционные материалы / Пер. с англ. П.Г. Бабаевский, А.А. Грабильников, С.Г. Кулик: Под ред. М. Ричардсона, П.Г. Бабаевского. М.: Химия, 1980. 472 с.

Черкасова Светлана Алексеевна – ассистент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета
Боровских Валентин Ефимович – профессор кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета

Cherkasova Svetlana Alekseevna – Junior Research Staff Member of the Department of « Technical mechanics and details of machines» of Saratov State Technical University
Borovskih Valentin Efimovich – professor of the Department of « Technical mechanics and details of machines» of Saratov State Technical University

УДК 621.791.03-52

В.В. Шалунов, Д.В. Комаревцев, И.М. Семенихин**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ НА ТОКАРНО-ФРЕЗЕРНЫХ АВТОМАТАХ ПРОДОЛЬНОГО ТОЧЕНИЯ С ЧПУ**

Описаны особенности методики конструирования структуры технологических операции, выполняемых на токарно-фрезерных автоматах продольного точения с ЧПУ.

Автоматизация проектирования технологических операций, автоматы продольного точения, технологическая подготовка производства, токарная операция

V.V. Shalunov, D.V. Komarevtsev, I. M. Semenikhin**AUTOMATED DESIGN OF PRODUCTION OPERATIONS AT CNC-MILLING MACHINES CNC LONGITUDINAL TURNING**

The features of the structure design methodology process operates at turning and milling machines longitudinal turning with CNC.

Design automation of technological operations, automatic longitudinal turning, production planning, turning operation

Конструктивной особенностью токарно-фрезерных автоматов продольного точения с ЧПУ является наличие многоинструментальных суппортов (одного или двух), имеющих по позиции для размещения резцов и приводных инструментов. Работа всех этих устройств может происходить одновременно, что открывает возможности при проектировании технологической операции организовать рациональное использование параллельной обработки отдельных поверхностей детали.

В соответствии с принятой в разрабатываемой системе проектирования ТП механообработки [1,2] последовательностью проектирования технологических операций первоначально производится оценка возможности реализации рассматриваемого кортежа технологических переходов на данном виде оборудования. Данная процедура носит скорее контрольный характер, так как аналогичные действия выполнялись на стадии разработки маршрута ТП, но ее необходимость диктуется требованием дополнительной проверки по уточненным данным. В первую очередь определяется технологическая возможность оборудования по обработке в соответствии с требуемыми параметрами качества заданных поверхностей и базирования детали по выбранным поверхностям.

Следующей задачей является определение возможных при реализации кортежа технологических переходов средств технологического оснащения. Применительно к данному виду оборудования определение используемого установочно-зажимного приспособления не вызывает трудностей, так как ее номенклатура ограничена оправками типоразмер которых устанавливается в соответствии с диаметральными размерами базовых поверхностей. Формирование же инструментального комплекта для каждой детали носит многовариантный характер, так как отдельная поверхность может быть обработана

несколькими видами инструментов. Для генерации вариантов назначения обрабатывающих инструментов для изготовления отдельных видов элементарных поверхностей сформирована база данных, включающая все возможные сочетания использования инструментов для получения каждой элементарной поверхности. Кроме этого, размещение кода конкретного инструмента в базе данных выполнено с учетом относительной станкоемкости реализации технологического перехода (табл. 1).

Формирование варианта комплекта обрабатывающих инструментов для каждого наименования деталей $\{I_1, \dots, I_j, \dots, I_{n_i}\}$ производилось на основе выбора кода инструмента для каждой элементарной поверхности с учетом ряда дополнительных технологических ограничений (систематизированное описание которых представлено в табл. 1.).

Из этих вариантов отсеиваются те, назначение которых невыполнимо по ограничениям, связанным с адресным распределением отдельных инструментов по позициям. Отсев осуществляется по следующим правилам:

- количество инструментов различного наименования, входящих в комплект, не должно превышать 12, $(\sum_{j=1}^{n_i} C_j) \leq 12$;

- количество инструментов, размещение которых предусмотрено только в приводных позициях (сверла, фрезы, зенкеры, развертки, метчики, плашки и т.д.), не должно превышать 4 единиц, $(\sum_{j=1}^{n_i} C_j) \leq 4$.

Прошедшие такой отсев варианты комплектов обрабатывающих инструментов считаются допустимыми для обработки деталей. Из этих вариантов вычленяется лучший с учетом:

- однородности используемых инструментов, как показателя определяющего глубину переналадки при переходе на изготовление новой детали в рамках рассматриваемой номенклатуры;

- ориентировочной станкоемкости (определяемой по укрупненным формулам) изготовления всего комплекта деталей на данном виде оборудования.

Результатом выполненных действий является окончательно сформированный состав средств технологического оснащения для каждой детали, что позволяет перейти к задаче формирования допустимых вариантов структуры технологической операции.

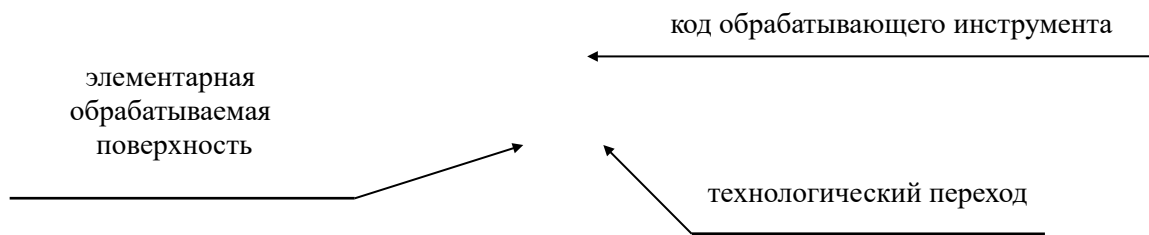
Таблица 1

№ п/п	Обрабатываемые поверхности	Обрабатывающий инструмент	Примечание
1.	поверхности за буртом	проходной резец	
2.	наружные цилиндрические, конические и фасонные поверхности	одним проходным резцом	задняя режущая кромка на должна мешать образованию профиля на детали
3.	канавки небольшой ширины на цилиндрической поверхности	канавочным резцом	профиль резца должен совпадать с профилем канавки
4.	закрытые профили большой длины	канавочным резцом, фрезой	при продольном перемещении
5.	обработка отверстий	сверла, зенкеры, зенковки, развертки	инструмент располагается в трехшпиндельном приспособлении

Учитывая конструктивные особенности станков выдвинуто предположение, что наибольшее внимание при создании структуры операции должно быть уделено

максимальному использованию параллельной обработки поверхностей детали. Основываясь на этом положении разработана методика конструирования структуры операции, особенность которой заключается в том, что рассматривается система, состоящая из отдельных взаимосвязанных компонент, каждая из которых содержит информацию: элементарная поверхность – обрабатывающий инструмент – технологический переход. Каждая компонента сама может быть описана как система, но ее назначение и использование нельзя описать независимо от других компонент системы. Действиям системы присущи совмещенность и параллелизм. Исходя из вышесказанного, объясняется целесообразность разработки методики с использованием теории сетей Петри.

Описание отдельного компонента системы имеет вид:



Рассмотрим пошаговую реализацию методики формирования вариантов структуры технологических операций, заключающуюся в рациональном размещении обрабатывающих инструментов по позициям и назначении оптимальной последовательности реализации технологических переходов.

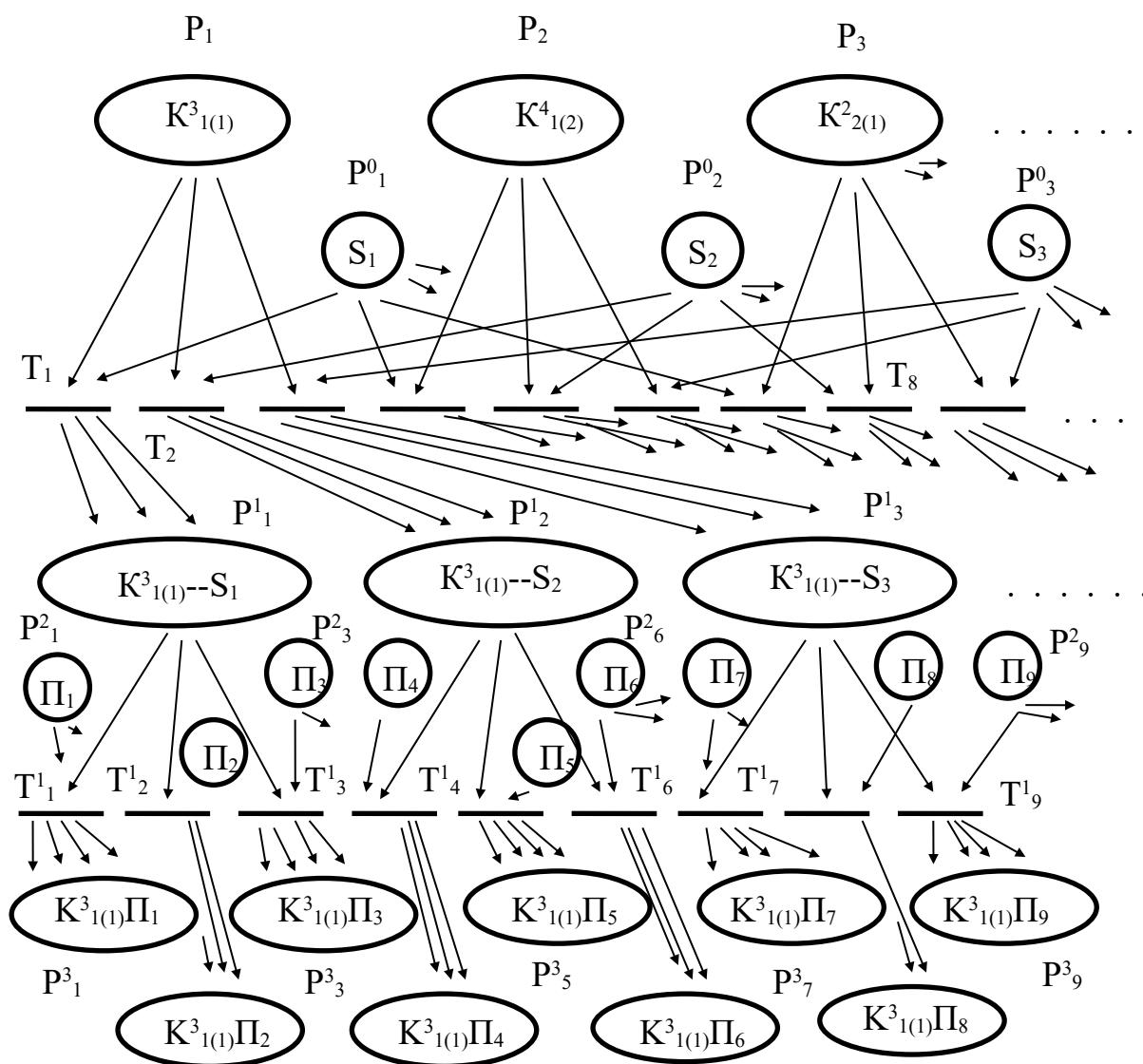
Исходная маркировка спроектированной сети заключается в том, что каждому событию из множества $\{P_1, P_2, P_3, \dots\}$ присваивается метка, соответствующая описанию одного из компонентов системы.

В диапазон задач, решаемых на первом шаге сети входит анализ возможности размещения обрабатывающего инструмента (кодовое обозначение которого включено описание компоненты) в позициях станочной системы:

- реакция множества сетевых переходов $\{T_1, T_2, T_3, \dots\}$ зависит от возможности установки инструмента в одном из трех суппортов, регламентированной множеством событий $\{P_1^0, P_2^0, P_3^0\}$;

- реакция множества сетевых переходов $\{T_1^1, T_2^1, T_3^1, \dots\}$ зависит от возможности установки инструмента в конкретной позиции, что определяется событиями из множества $\{P_1^2, P_2^2, P_3^2, \dots\}$. Результатом моделирования с использованием аппарата сетей Петри на данном шаге определяются все допустимые решения по размещению инструментов и, как следствие, варианты привязки каждого компонента системы к инструментальным позициям станка.

В дальнейшем производится последовательное объединение комплексов в варианты технологической операции. С этой целью выполняются действия по определению потенциальных возможностей для создания инструментальных наладок. Посредством сконструированной структуры сети и закреплением за множествами сетевых переходов специфических функций, происходит объединение комплексов не использующих одни и те же инструментальные позиции. Количество множеств сетевых переходов, используемых в данной процедуре, зависит от числа комплексов системы, заданных при исходной маркировке сети, и соответствующих числу технологических переходов в рассматриваемой технологической операции. Последовательный спуск по сети обеспечивает наращивание информации, заключенной в метках, и дополняет формирующиеся варианты размещения инструментов по позициям станка новыми комплексами.



Фрагмент сети Петри структуры технологической операции

Таким образом, на заключительном этапе определяются все возможные варианты, маркировка каждого из которых включает все комплексы. Этот признак является одним из показателей правильности выполнения моделирования спроектированной сети.

Следующей стадией разработки структуры технологической операции является задача установления последовательности выполнения технологических переходов. Эта задача отличается также многовариантностью решений, так как при одной инструментальной наладки последовательность и временные интервалы реализации технологических переходов могут быть различны. Первоначально устанавливались варианты реализации технологических переходов по последовательности их выполнения посредством следующих проверок:

- комплексы системы, описывающие обработку одной и той же поверхности должны быть расположены по порядку реализации технологических переходов;
- учет пространственных ограничений, касающихся пространственного расположения поверхностей (например: отверстие - внутренняя канавка, наружная цилиндрическая поверхность - шлицевая поверхность), производится на основе данных о конструкции обрабатываемой детали,

- анализируются характерные особенности по расположению отдельных технологических переходов в структуре технологической операции (например: отрезка, центровка).

Сформированные последовательности выполнения технологических переходов проверяются на возможность использования параллельной обработки с использованием следующих положений:

- параллельная обработка может быть применена только для соседних по последовательности комплектов системы;

- обязательным условием является требование размещения инструментов на различных суппортах станка;

- не могут быть выбраны комплекты, относящиеся к одной обрабатываемой поверхности;

- учитываются ограничения по пространственному расположению поверхностей;

- перемещения рабочих органов станка при реализации технологических переходов, анализируемых для объединения в параллельную обработку, должны быть близки и не противоречить друг другу.

- допустимые варианты режимов обработки для технологических переходов должны содержать хотя бы одно одинаковое сочетание.

Дополнительно проводится анализ вариантов режимов обработки из множества допустимых по удовлетворению ограничений, отражающих одновременную реализацию технологических переходов. Среди них:

- суммарная мощность, затрачиваемая на резание, не должна превышать эффективной мощности станка;

- суммарное усилие, допускаемое прочностью механизма подачи станка, (в случае использования одинаковых кинематических цепей при реализации рассматриваемых переходов) не должно превышать прочность механизма подачи станка.

Таким образом, на основе выполненной проверки и отсева по ее результатам невозможных для использования решений по структуре технологических операций, формируется множество вариантов, включающее множество вариантов последовательностей выполнения технологии с учетом параллельной реализации технологических переходов. Окончательный выбор структуры технологической операции производится по критериям, отражающим экономическую эффективность выполнения обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Бочкарев П.Ю. Планирование технологических процессов в условиях многономенклатурных механообрабатывающих систем. Теоретические основы разработки подсистем планирования технологических операций: учеб. пособие / П.Ю. Бочкарев, А.Н. Васин. Саратов: СГТУ, 2004. 74 с.

Шалунов Вячеслав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Shalunov Vyachislav Viktorovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, of chair «Designing of technical and technological complexes» of the Saratov State Technical University

Комаревцев Денис Вячеславович –

Komarevcev Denis Vyacheslavovich –

аспирант кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

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

Семенихин Иван Михайлович – студент ПТК -31 специальности «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Semenikhin Ivan Mikhailovich – 3rd year student of sub-department «Designing of technical and technological complexes» of the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.924.93

В.В. Шпилев, М.К. Решетников, О.Ю. Давиденко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУИ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКЕ

Получена математическая модель многофазового движения гетерогенной струи с учетом совместного движения компонент и возможности определения величин, описывающих внутренние и внешние взаимодействия. Полученные уравнения, базирующиеся на одном из основных принципов механики – уравнении сохранения импульса суммарного количества движения, позволяют учитывать взаимодействие фонового потока и частиц абразива, имеющих различные скорости, что предопределяет появление гидродинамических сил.

Гидроабразивная резка, математическая модель, уравнение сохранения количества движения, взвесенесущий поток

V.V. Shpilev, M.K. Reshetnikov, O.Y. Davidenko

MODELING OF HETEROGENEOUS JETS DURING WATERJET CUTTING

A mathematical model of a heterogeneous multi-phase movement of the jet with a joint motion of the components and the possibility of determining the quantities describing the internal and external interactions. The resulting equations, based on one of the basic principles of mechanics - the equation of conservation of momentum is the total amount of traffic, allow for the interaction of the background flux and abrasive particles with different speed, which determines the appearance of the hydrodynamic forces.

Waterjet cutting, the mathematical model, the equation of conservation of momentum, Feed bearing suspension

Метод гидроабразивной резки – альтернатива не только механической, но и лазерной, плазменной, электроискровой и кислородной резки, 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.

Так как наибольшее влияние на процесс гидроабразивной резки оказывают скорость струи, её диаметр и концентрация частиц, то для того чтобы увеличить эффективность резания необходимо математически смоделировать процесс движения жидкости и абразивных частиц с возможностью определения величин, описывающих внутренние и внешние взаимодействия. В основу модели заложим уравнение сохранения импульса суммарного количества движения, позволяющее учитывать взаимодействие фонового потока и частиц абразива, имеющих различные скорости, что предопределяет появление гидродинамических сил.

При математическом моделировании процессов и движений гетерогенных смесей были приняты 2 допущения:

1. Размеры включений или неоднородностей в смеси во много раз больше молекулярно-кинетических (расстояний между молекулами, размеров кристаллической решетки, средних длин свободного пробега молекул). Таким образом, указанные неоднородности содержат большое количество молекул.

2. Размеры указанных неоднородностей во много раз меньше расстояний, на которых осредненные или макроскопические параметры смеси или фаз меняются существенно. Таким образом, размеры неоднородностей много меньше длин рассматриваемых.

Первое допущение позволяет использовать классические представления и уравнения механики сплошных однофазных сред. При этом для описания физических свойств можно использовать уравнения и параметры, полученные из опытов в однофазном состоянии.

Второе допущение позволяет описывать макроскопические процессы в гетерогенной смеси методами механики сплошной среды с помощью осредненных или макроскопических параметров.

В процессе движения такой среды, в результате взаимодействия фонового потока и частиц абразива, обусловленных различными скоростями, предопределяется появление гидродинамических сил, например сил сопротивления. Следовательно, в уравнениях сохранения необходимо учитывать указанные взаимодействия фонового потока и движущихся твердых частиц.

Так уравнение неразрывности для фонового потока и частиц абразива можно представить в виде [1]:

$$\frac{1}{\varphi_1} \cdot \frac{d\varphi_1}{dx} + \frac{1}{\bar{v}_1} \cdot \frac{d\bar{v}_1}{dx} + \frac{1}{F} \cdot \frac{dF}{dx} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{1}{\varphi_2} \cdot \frac{d\varphi_2}{dx} + \frac{1}{\bar{v}_2} \cdot \frac{d\bar{v}_2}{dx} + \frac{1}{F} \cdot \frac{dF}{dx} = 0. \quad (2)$$

где \bar{v}_1 – скорость движения фонового потока; \bar{v}_2 – скорость движения частиц абразива; φ_1 , φ_2 – концентрация первой и второй компоненты взвесенесущего потока; F – площадь живого сечения потока.

В интегральной форме уравнение расхода взвесенесущей среды имеет вид:

$$m = m_1 + m_2 = F(\rho_1\varphi_1\bar{v}_1 + \rho_2\varphi_2\bar{v}_2).$$

Уравнение количества движения:

$$\frac{m_1}{F} \cdot \frac{d\bar{v}_1}{dx} = \frac{d\varphi_1 E_1}{dx} + \varphi_1 \rho_1 \bar{B} - \bar{R}; \quad (3)$$

$$\frac{m_2}{F} \cdot \frac{d\bar{v}_2}{dx} = \frac{d\varphi_2 E_2}{dx} + \varphi_2 \rho_2 \bar{B} + \bar{R}. \quad (4)$$

Здесь $m_1 = \varphi_1 \rho_1 \bar{v}_1 F$; $m_2 = \varphi_2 \rho_2 \bar{v}_2 F$; E_1 и E_2 – интенсивность обмена энергией между первой и второй компонентой взвесенесущего потока; ρ_1 и ρ_2 – плотность первой и второй компоненты взвесенесущего потока; \bar{B} – вектор массовых сил; \bar{R} – сила гидродинамического взаимодействия компонент потока,

Уравнение количества движения для среды в целом получается сложением уравнений (3) и (4):

$$m d\bar{v} / dx = F d(\varphi_1 E_1 + \varphi_2 E_2) / dx + \rho \bar{B} F, \quad (5)$$

Уравнение сохранения энергии для одномерного взвесенесущего потока имеет вид:

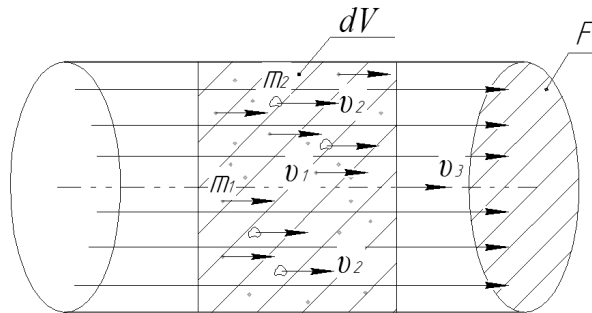
$$\rho_1 \varphi_1 \bar{v}_1 \frac{d}{dx} \cdot \frac{\bar{v}_1^2}{2} = \frac{d\varphi_1 E_1}{dx} \bar{v}_1 + A_{12} + A_{mp} + \rho_1 \varphi_1 \bar{B} \bar{v}_1; \quad (6)$$

$$\rho_2 \varphi_2 \bar{v}_2 \frac{d}{dx} \cdot \frac{\bar{v}_2^2}{2} = \frac{d\varphi_2 E_2}{dx} \bar{v}_2 - A_{12} + A_{mp} + \rho_2 \varphi_2 \bar{B} \bar{v}_2, \quad (7)$$

В некоторых случаях, когда инерционные эффекты относительного движения компонент потока несущественны, для описания гетерогенных смесей можно использовать и диффузионное (одножидкостное) приближение.

Рассмотрим более детально уравнение сохранения количества движения: выделим в потоке произвольный объем V (рисунок) и применим к нему теорему об изменении количества движения: главный вектор всех внешних массовых и поверхностных сил, действующих на поток, равен сумме изменений её импульса конвективно отданного или воспринятого системой в единицу времени. Для гетерогенной среды изменение вектора количества движения фонового потока составит:

$$\frac{d}{d\tau} \int_V (\rho_1 \bar{v}_1 dV) = \int_V \frac{d}{d\tau} (\rho_1 \varphi_1 \bar{v}_1 dV). \quad (8)$$



Гетерогенный поток

Раскроем производную от произведения вектора скорости фонового потока \bar{v}_1 на массу фонового потока $\rho_1 \varphi_1 dV$ в элементарном объеме:

$$\frac{d}{d\tau} (\rho_1 \varphi_1 \bar{v}_1 dV) = \rho_1 \varphi_1 dV \frac{d\bar{v}_1}{d\tau} + \bar{v}_1 \frac{d(\rho_1 \varphi_1 dV)}{d\tau}. \quad (9)$$

Производную по времени во втором слагаемом заменим по уравнению неразрывности фонового потока (1), в итоге получим:

$$\frac{d}{d\tau} \int_V \rho_1 \varphi_1 \bar{v}_1 dV = \int_V \rho_1 \varphi_1 \frac{d\bar{v}_1}{d\tau} dV. \quad (10)$$

Определим теперь векторы внешних сил, действующих на фоновый поток выделенного объема V . Главный вектор поверхностных сил:

$$\vec{P}_1 = \int_{S_1} \Pi_1 d\vec{S}_1,$$

где S_1 – поверхность, ограничивающая фоновый поток в объеме V ; Π_1 – тензор поверхностных сил, действующих на фоновый поток.

Поверхность S_1 разобьем на две составляющие: S_{11} – поверхность, по которой фоновый поток соприкасается с собой же, S_{12} – поверхность, по которой фоновый поток соприкасается с частицами абразива. Тогда

$$\vec{P}_1 = \int_{S_{11}} \Pi_{11} d\vec{S} + \int_{S_{12}} \Pi_{12} d\vec{S}. \quad (11)$$

Первое слагаемое преобразуем с помощью теоремы Гаусса-Остроградского:

$$\int_{S_{11}} \Pi_{11} d\vec{S} = \int_V \operatorname{div} \Pi_{11} \varphi_1 dV. \quad (12)$$

Второе слагаемое в (11) представим формально через объемный интеграл от некоторой силы взаимодействия между компонентами потока \vec{R}_{12} в расчете на единицу массы:

$$\int_{S_{12}} \Pi_{12} d\vec{S} = \int_V \rho_1 \varphi_1 \vec{R}_{12} dV. \quad (13)$$

Вектор массовой силы, отнесенной к единице массы, действующей на фоновый поток, обозначим через \vec{B}_1 . Тогда суммарная сила:

$$\vec{P}_1 = \int_V \rho_1 \varphi_1 \vec{B}_1 dV. \quad (14)$$

Приравняв изменение количества движения (10) и (11) импульсу всех сил (12)-(14) и учитывая произвольность в выборе объема, окончательно получаем для фонового потока:

$$\rho_1 \varphi_1 \frac{d\vec{v}_1}{d\tau} + x(\vec{v}_3 - \vec{v}_1) = \operatorname{div} \varphi_1 \Pi_{11} + \rho_1 \varphi_1 \vec{R}_{12} + \rho_1 \varphi_1 \vec{B}_1; \quad (15)$$

аналогично для частиц абразива:

$$\rho_2 \varphi_2 \frac{d\vec{c}_2}{d\tau} + x(\vec{c}_2 - \vec{c}_3) = \operatorname{div} \varphi_2 \Pi_{22} + \rho_2 \varphi_2 \vec{R}_{21} + \rho_2 \varphi_2 \vec{B}_2. \quad (16)$$

Сложим (15) и (16), чтобы получить уравнение изменения количества движения для всей среды в целом:

$$\rho_1 \varphi_1 \frac{d\vec{c}_1}{d\tau} + \rho_2 \varphi_2 \frac{d\vec{c}_2}{d\tau} + x(\vec{c}_2 - \vec{c}_1) = \text{div}\Pi + \rho\vec{B}. \quad (17)$$

В уравнении (17) учтено, что $\rho_1 \varphi_1 \vec{R}_{12} + \rho_2 \varphi_2 \vec{R}_{21} = 0$ и приняты обозначения: $\rho_1 \Pi_{11} + \rho_2 \Pi_{22} = \Pi$; $\rho_1 \varphi_1 \vec{B}_1 + \rho_2 \varphi_2 \vec{B}_2 = \rho\vec{B}$ при $\vec{B}_1 = \vec{B}_2 = \vec{B}$; Π – тензор поверхностных напряжений, действующих в гетерогенной среде. Уравнение количества движения для всей среды в целом можно записать в виде:

$$\frac{d(\vec{v}_1 \rho_1 \varphi_1 V)}{V d\tau} + \frac{d(\vec{v}_2 \rho_2 \varphi_2 V)}{V d\tau} = \text{div}\Pi + \rho\vec{B}, \quad (18)$$

$$\frac{d(\rho V)}{d\tau} = 0,$$

Поскольку для среды в целом вынесем в левой части уравнения (18) из под знака производной ρV . Принимая во внимание также равенства $\varphi_1 V = V_1$; $\varphi_2 V = V_2$,

$x_1 = \frac{\rho_1 V_1}{\rho V}$ и $x_2 = \frac{\rho_2 V_2}{\rho V}$, окончательно получаем:

$$\frac{d\vec{v}}{d\tau} = \frac{1}{\rho} \text{grad}\Pi + \vec{B}, \quad (19)$$

где $\vec{v} = x_1 \vec{v}_1 + x_2 \vec{v}_2$; $\rho = \rho x_1 + \rho x_2 = \rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2$, \vec{B} – вектор массовой силы, отнесенной к единице массы, действующей на фоновый поток.

На основе полученных уравнений можно получить расчетные зависимости, определяющие основные параметры гидроабразивной струи, её скорость и диаметр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дейч М.Е. Гидрогазодинамика / М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин. М.: Энергоатомиздат, 1984. 428 с.

Шпилев Василий Владимирович – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Shpilev Vasily Vladimirovich – graduate student of chair «Manufacturing Engineering» of the 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» of Saratov State Technical University

Давиденко Олег Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

Davydenko Oleg Yu. – doctor of technical sciences, professor of chair «Manufacturing Engineering» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621 941.26.08

М.В. Виноградов, А.А. Игнатъев, Е.А. Сигитов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ В ПРЕЦИЗИОННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТАНКАХ НА ОСНОВЕ ПРИВОДА ПОДАЧИ С МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ФРИКЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

Предложена методология повышения точности формообразующих движений рабочих органов автоматизированных металлорежущих станков на основе привода подачи с многоступенчатой фрикционной передачей и переменной структурой управления.

Точность, привод подачи, фрикционная передача, трение, скольжение, модель, управление, обратная связь

M.V.Vinogradov, A.A.Ignatyev, E.A.Sigitov

MAINTENANCE OF ACCURACY OF EXECUTIVE MOVEMENTS IN THE PRECISION AUTOMATED MACHINE TOOLS ON THE BASIS OF A DRIVE OF GIVING WITH A MULTISTAGE FRICTION GEAR

The methodology of increase of accuracy of form-building movements of working bodies of the automated metal-cutting machine tools on the basis of a drive of giving with a multistage friction gear and variable structure of management is offered.

Accuracy, drive of presenting, friction issue, friction, slide, model, management, feedback

Обеспечение конкурентоспособности продукции машино- и приборостроения на внутреннем и международном рынках связано с проблемой повышения ее качества. Обеспечение точности токарной обработки малогабаритных деталей машино- и приборостроения по 1-2 качеству в автоматизированном режиме обуславливает особое внимание к характеристикам прецизионных станков с ЧПУ и ГПМ. К прецизионным модулям предъявляются высокие требования как по конструкции станка в целом, так и по конструкции отдельных узлов с точки зрения точности и надежности, динамических характеристик, термостабильности, диагностированию состояния, то есть всего того, что обеспечивает устойчивое функционирование.

Прецизионные токарные модули, обрабатывающие детали с размерами не более 50...70 мм по указанному выше качеству, должны обеспечивать погрешность обработки не более 0,5...1 мкм, шероховатость поверхности 0,03...0,1 мкм. При сверхпрецизионной токарной обработке силы резания малы (не более 30...50 Н), износ инструмента, особенно при резании легкообрабатываемых материалов, незначителен, и, кроме того, обеспечивается стабильный температурный режим работы модуля. Использование аэростатических опор и средств балансировки обеспечивает высокую точность вращения и жесткость шпинделя. В этих условиях растут требования к приводам подачи, чьи характеристики непосредственно влияют на качество формообразующих перемещений рабочего органа - суппорта токарного модуля. Сверхпрецизионная обработка требует обеспечения точности позиционирования суппорта 0,01...0,1 мкм, что часто трудно реализовать из-за несовершенства традиционных механических передач приводов.

В основу методологии исследований положен системный подход к обеспечению точности формообразующих движений рабочих органов. При этом сложные взаимосвязи в технологической системе упрощаются благодаря тому, что выбраны формообразующие движения рабочих органов, которые имеют в данном случае основное значение в формировании вклада в результирующую погрешность обработки как меру точности. Предлагается обоснованная феноменологическая модель точности сверхпрецизионной обработки в виде двумерной функции нормального распределения погрешностей, сформированной на основе учета погрешностей двух формообразующих движений: погрешности позиционирования рабочего органа с инструментом и погрешности вращения шпинделя с заготовкой при условии минимизации влияния на точность обработки в установленных пределах возмущающих воздействий (температурных, вибрационных, силовых, упругодеформационных, триботехнических, износа инструмента).

Методология обеспечения точности обработки базируется на концепции системного подхода к проблеме обеспечения технологической надежности прецизионных МРС (рис. 1). Необходимый уровень качества станка определяется, в первую очередь, требованиями к точности изготовленных деталей. В данном исследовании системный подход к указанной проблеме развивается в направлении решения ряда фундаментальных и прикладных задач, связанных с совершенствованием приводов подачи.

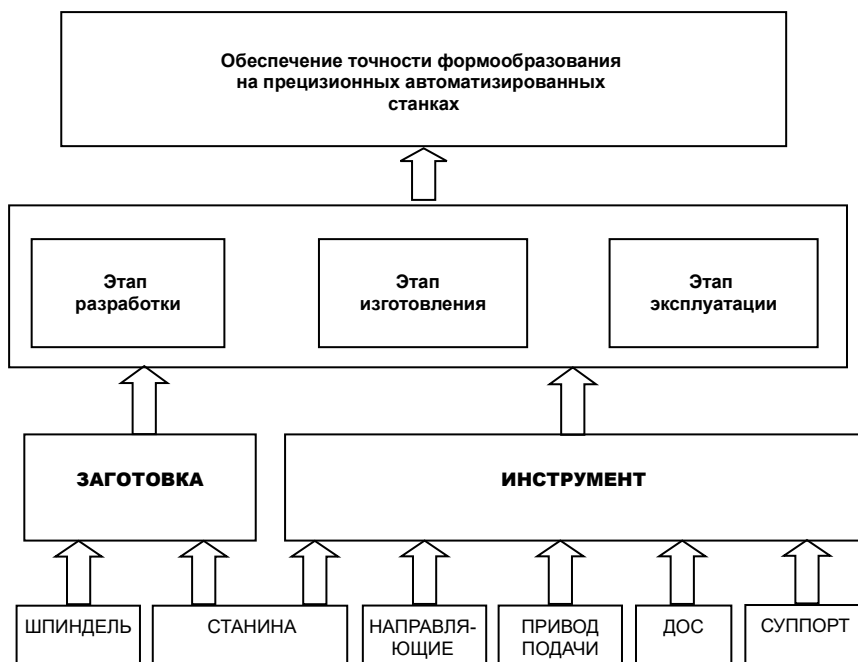


Рис. 1. Структура обеспечения точности формообразования на прецизионных автоматизированных станках

Длительные исследования токарных, шлифовальных и суперфинишных станков с ЧПУ, станков-автоматов и ГПМ определили комплекс факторов, обеспечивающих точность формообразования (рис. 2). Для осуществления сверхпрецизионной обработки необходимо обеспечить ряд организационно-технических мероприятий по минимизации возмущающих воздействий. В частности, следует обеспечить термостабильность окружающей среды в пределах $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, практически исключить влияние вибрационных возмущений в диапазоне до 400 Гц, ограничить силы резания величиной не более 50 Н, обеспечить шероховатость поверхности режущей части резца $Ra\ 0,001 \dots 0,01$ мкм.

Известно, что при малых перемещениях в станках в условиях трения твердых тел даже при постоянной силе тяги может возникать неравномерность скольжения, представляющая фрикционные автоколебания. Вредными проявлениями этого вида колебаний являются неплавность движения суппортов с режущим инструментом по направляющим и, как следствие, периодичность микрогеометрии обработанных поверхностей и погрешности позиционирования, представляющие рассогласование между заданной и фактической величинами подачи.

Применяемые в современных автоматизированных металлорежущих станках высокоточные датчики положения и вычислительные устройства позволяют контролировать движение рабочего органа станка вплоть до долей микрометра и формировать управляющее воздействие для осуществления движения на микрометровую величину. Использование традиционных исполнительных механизмов, предназначенных для осуществления требуемого движения в реверсивном режиме, сопряжено с трудностями реализации малых перемещений из-за наличия зазоров в зубчатых передачах, недостаточной жесткости ременных передач.

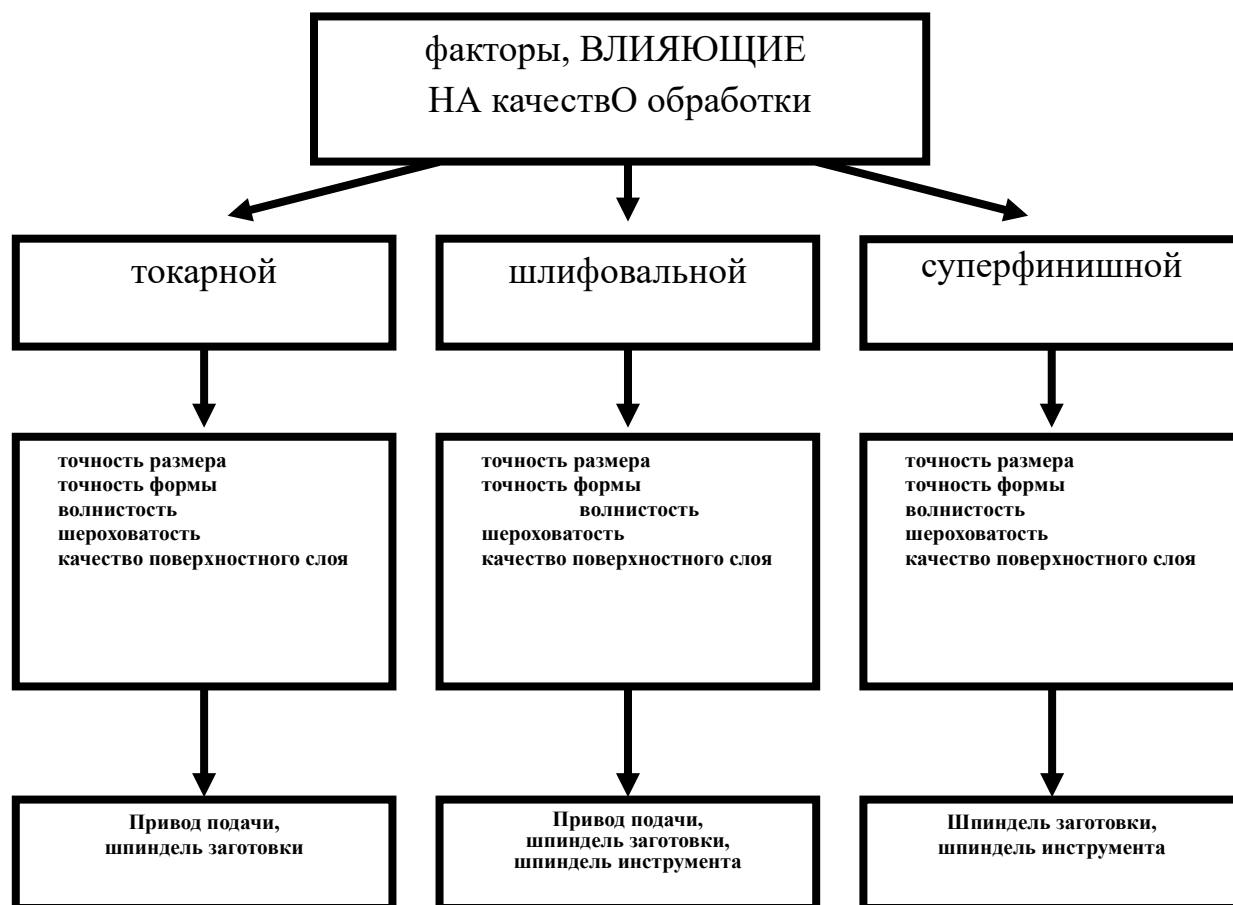


Рис. 2. Основные факторы, влияющие на качество прецизионной обработки

Имеется положительный опыт использования электромеханического привода с фрикционной передачей в 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.

Анализ методов повышения точности движения рабочих органов прецизионных МРС и опыт исследований, выполненных в СГТУ, показал, что МФП обладает высокой технологичностью, не требует специализированных (зуборезных и т.п.) станков для производства, ее элементы могут сравнительно легко выполняться по самым высоким требованиям точности. Отсутствие зазоров и упругих элементов в кинематической схеме гарантирует высокую жесткость и низкую виброактивность привода, отсутствие геометрического скольжения обеспечивает высокий КПД. Важным преимуществом МФП является возможность реализации режима стружкодробления, недостижимого другими приводами. Экспериментально-аналитическое исследование работы привода подачи с МФП в режиме стружкодробления подтвердило его высокие динамические характеристики, а полученные аналитические зависимости позволяют оценить действительное значение подачи. Установлено, что привод с МФП модуля ТПАРМ обеспечивает возвратно-поступательные движения рабочего органа в режиме стружкодробления с частотой до 20 Гц и амплитудой до 0,1 мм. Указанные факторы в сочетании с направляющими с низким трением дают основание для применения МФП в составе прецизионного привода подачи.

Феноменологическая модель точности сверхпрецизионной обработки в виде двумерной функции нормального распределения погрешностей учитывает погрешности двух формообразующих движений: позиционирование рабочего органа с инструментом и вращение шпинделя с заготовкой, при условии минимизации влияния на точность обработки в установленных пределах возмущающих воздействий (температурных, вибрационных, силовых, упругодеформационных, триботехнических, износа инструмента).

Основные показатели качества P_k токарной обработки: точность размера T_p , точность формы T_ϕ , волнистость B , шероховатость $Ш$, качество поверхностного слоя K_{nc} (рис. 2)

$$P_k = f(T_p, T_\phi, B, Ш, K_{nc}). \quad (1)$$

Доминирующими показателями качества P_{2k} можно принять точность размера и волнистость, т.к. они наиболее явно влияют на эксплуатационные свойства изделий, сравнительно просто определяются и достигаются наладкой оборудования.

$$P_{2k} = f(T_p, B). \quad (2)$$

Эти факторы часто взаимосвязаны, т.к. определяются в основном точностью относительных движений инструмента и детали (рис. 2).

Для количественной оценки точности T_n по результатам реального измерения деталей вычисляется коэффициент запаса точности C_T по формуле

$$C_T = \frac{S_a - S_n}{6\sigma}, \quad (3)$$

где S_a, S_n – верхний и нижний предел допуска, соответственно; σ – среднее квадратическое отклонение размеров деталей.

Точность T_n оценивается исходя из следующих соотношений: $C_T > 1,33$ – стабильный процесс формообразования, хороший запас точности; $C_T = 1,0 \dots 1,33$ – критический режим, так как могут появиться дефекты детали, требуется внимательное наблюдение; $C_T < 1,0$ – необходимо выяснить причину появления дефектных деталей и принять меры управляющего воздействия, неудовлетворительный запас точности.

Отклонения от точности (погрешность обработки) носит вероятностный характер, поэтому совместная функция плотности вероятностей будет определять вероятность того, что значе-

ния отклонений от размера и круглости для двух точек наблюдения находятся внутри некоторой определенной пары промежутков величин в любой момент времени

$$P_{2\kappa}(T_p; B) = \lim_{\Delta T_p \rightarrow 0} \lim_{\Delta B \rightarrow 0} \frac{[P_{2\kappa}(T_p) - P_{2\kappa}(T_p + \Delta T_p); P_{2\kappa}(B) - P_{2\kappa}(B + \Delta B)]}{\Delta T_p \Delta B}. \quad (4)$$

Совместная функция плотности вероятности обеспечивает достаточно большое количество информации о качестве процесса формообразования. Учет всех комбинаций величин отклонений позиционирования инструмента и детали и вращения шпинделей нагляднее всего представить в трехмерном пространстве (рис. 3). При этом функции точности позиционирования инструмента и детали и вращения шпинделей сравнительно легко измерить, что способствует их широкому применению для описания случайных процессов формообразования.

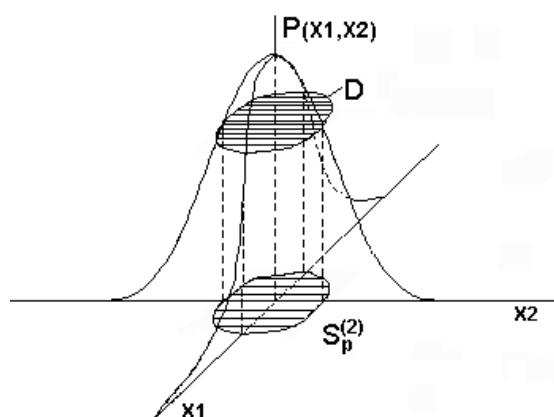


Рис. 3. Модель точности обработки

Совместная функция плотности вероятности определяет вероятность того, что значения амплитуды изучаемого процесса на двух точках наблюдения находятся внутри некоторой определенной пары промежутков амплитуд в любой момент времени, т.е.

$$p(x; y) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{[P(x) - P(x + \Delta x); P(y) - P(y + \Delta y)]}{\Delta x \Delta y}. \quad (5)$$

Совместная функция плотности вероятности является гораздо более сложной, чем другие функции плотности вероятности, и хотя она обеспечивает довольно большое количество информации об изучаемом процессе, эта функция очень редко применяется на практике. Одна из существенных причин этого положения, вероятно, заключается в трудоемкости и продолжительности аналоговых измерений этой функции. Процесс измерений совместной функции плотности вероятности продолжителен, главным образом, потому, что необходимо учитывать все комбинации значений амплитуд x и y . Следовательно, результаты таких измерений получаются не в двухмерном, а скорее, в трехмерном пространстве.

Для случая n параметров решающее правило для признания МРС соответствующим заданному критерию точности

$$\bar{X} \in S_p^{(n)}, \quad (6)$$

где $\bar{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Параметрическая модель создается в течение ряда этапов. Для реальных технических объектов зависимость показателя качества от значений их основных параметров обычно сложна и получить ее в явном виде можно только для простейших объектов. Создание параметрической модели качества обработки на МРС существенно усложняется необходимостью анализа зависимости показателя качества – точности обработки – от параметров формообразующей подсистемы и процесса резания.

Первый этап такого анализа, в наименьшей степени поддающийся формализации – определение перечня параметров (составляющих вектора), оказывающих влияние на показатель качества.

Второй этап создания параметрической модели заключается в определении в пространстве параметров $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ тех их разрешенных значений, которые позволяют сформировать область $S_p^{(n)}$, соответствующую заданному значению показателя качества.

Третий этап построения модели связан с выделением доминирующих параметров, связанных с формообразованием на данном МРС при дополнительных ограничениях, накладываемых на внутренние и внешние влияющие факторы и выходные параметры точности обработки. При этом используются результаты экспериментальных исследований с применением методов математической статистики и планирования многофакторных экспериментов. Указанное позволяет в конечном итоге сократить количество измеряемых параметров вектора \bar{X} , и осуществить переход от исходной n - мерной допусковой области $S_p^{(n)}$ к области с меньшей размерностью $S_p^{(m)} (m < n)$. Следует отметить, что область $S_p^{(m)}$ в этом случае представляет собой m – мерный гиперпараллелепипед. Снижение размерности допусковой области упрощает процесс построения и исследования искомой параметрической модели качества обработки на МРС.

В [теории управления управляемость](#) обозначает возможность перевести систему из одного состояния в другое. Другими словами управляемость это способность объекта должным образом реагировать на команды управления. Это одно из важнейших свойств [системы управления](#) и [объекта управления](#) описывающее возможность перевести систему из одного [состояния](#) в другое. Система управляема, если каждому воздействию управления соответствует строго определенное состояние параметров объекта, неуправляема или малоуправляема, если объект управления меняет свои параметры произвольно.

Для токарных станков при дополнительных ограничениях, накладываемых на внутренние и внешние влияющие факторы и выходные параметры точности обработки (при условии достаточно жесткой конструкции, незначительный износ инструмента и т.п.) доминирующими параметрами, связанными с формообразованием, являются точность вращения шпинделя и точность перемещения инструмента (суппорта).

Параметрическая модель точности обработки для двух определяющих параметров x_1 и x_2 может быть представлена в виде зависимости некоторого критерия $P(x_1, x_2)$ (рис. 3). Область D определяет минимально допустимое значение критерия $P_D(x_1, x_2)$, а ее проекция на плоскость параметров $S_p^{(2)}$ – допусковую область нахождения параметров x_1 и x_2 . Для случая токарной обработки параметр x_1 – точность позиционирования инструмента (суппорта) на прецизионном токарном модуле ТПАРМ достигла 0,2 мкм, x_2 – точность вращения детали (шпинделя). Эти параметры определяются на стадиях разработки, изготовления и эксплуатации станка. В результате такого подхода при условии минимизации тепловых и вибрационных возмущений точность при обработке деталей из алюминиевых сплавов на прецизионном токарном модуле ТПАРМ погрешность обработки не превышала 0,5 мкм при шероховатости поверхности R_a на уровне 0,04 мкм.

Комплекс моделей, описывающих физическую сущность процессов в многоступенчатой фрикционной передаче и определяющих параметрическую надежность привода, состоит из математической модели распределения сил между элементами двух- и трехступенчатой МФП, позволяющей определить оптимальные значения угла между векторами сил поджима роликов, минимальное взаимовлияние фрикционных пар при передаче момента, создающего тяговую силу и из математической модели, описывающей динамические характеристики МФП, включающие анализ моментов инерции роликов и штока и выявление доминирующей роли момента инерции первых двух роликов, позволившей рассматривать МФП как звено с передаточной функцией 2-го порядка и выполнить оптимизацию передаточных отношений ступеней МФП.

В динамическом режиме на фрикционный ролик действуют несколько сил – сила прижатия P_n , окружная сила F_t , приложенная со стороны ведущего ролика, и силы реакции N_k и

N_t (рис.7). Силами тяжести и трения в опорах роликов (в подшипниках) можно пренебречь ввиду их несопоставимой малости с действующими силами. В передаче может применяться линейная и угловая схема расположения осей роликов. В линейной схеме ролики располагаются на одной прямой, в угловой схеме – в углах многоугольника. Линейная схема расположения роликов трудно реализуема технически, поэтому в дальнейшем не рассматривается. При угловом расположении роликов действующие в передаче силы влияют друг на друга. Передаваемые окружные силы вызывают соответствующие силы реакции N_t , которые, складываясь с прижимными силами, изменяют действие последних на ролики в сторону увеличения или уменьшения.

Увеличение прижимных сил приводит к перегрузке передачи и ускоренному износу роликов, уменьшение может привести к пробуксовке передачи. Построена математическая модель, оптимизирующая силы прижатия роликов.

Входными параметрами модели являются геометрические параметры роликов ($d_1 - d_4$, $D_2 - D_4$), коэффициент трения k_{mp} роликов и требуемая максимальная развиваемая сила на выходе передачи $F_{треб}$. Выходными параметрами являются передаваемые каждым роликом окружные силы $F_{т1} - F_{т4}$, силы реакции $N_{к1} - N_{к5}$, прижимные силы $P_{n1} - P_{n4}$ и углы α и β между линиями, соединяющими оси роликов $O_1-O_2-O_3$ и $O_2-O_3-O_4$ (рис. 7).

Оптимальные значения углов α и β с точки зрения минимизации сил прижатия можно получить, решив систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{dP_{n1}(\alpha, \beta)}{d\alpha} = 0; \\ \frac{dN_{к4}(\alpha, \beta)}{d\beta} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Подставив параметры трехступенчатого фрикционного редуктора ТПАРМ, получим оптимальные значения углов $\alpha_o = 112,0^\circ$ и $\beta_o = 105,5^\circ$. При отклонении углов α и β от оптимальных значений увеличиваются требуемые силы прижатия $P_{n1} - P_{n3}$, необходимые для обеспечения заданной силы $F_{т4}$ на штоке. На рис. 8 представлены графики изменения сил $P_{n1} - P_{n3}$ и $N_{к4}$ в зависимости от углов α и β , сплошной и пунктирной линией обозначены графики при движении штока в разные стороны.

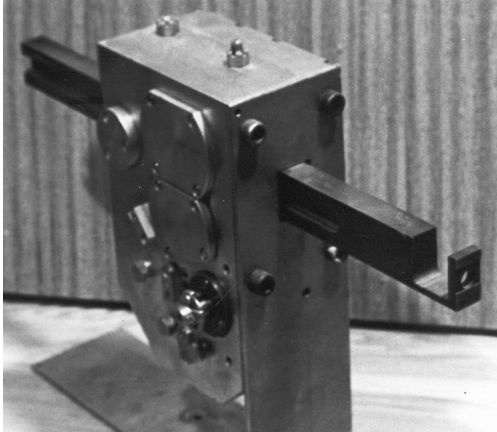


Рис.6. Трехступенчатая ФП модуля ТПАРМ

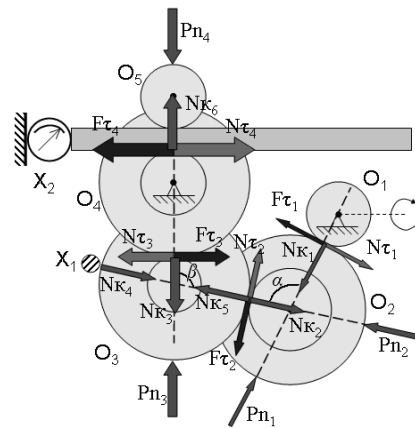


Рис.7. Схема взаимодействия сил в 3-ступенчатой ФП

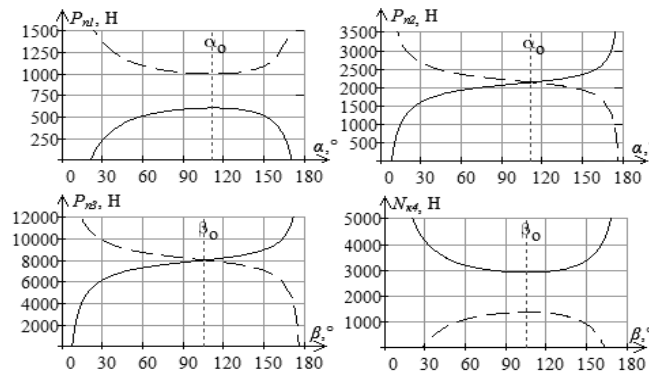


Рис. 8. Графики зависимостей сил $P_{n1} - P_{n3}$ и N_{k4} от углов α и β , сплошной и пунктирной линией отмечено движение штока в разные стороны

Оптимизация сил в приводе позволяет минимизировать его приведенный момент инерции и диапазон скоростей и ускорений движения суппорта. Для оптимизации распределения передаточных отношений пар роликов была построена соответствующая математическая модель. Для оперативного определения силы, развиваемой приводом в процессе эксплуатации, было разработано динамометрическое устройство (ДУ), позволяющее контролировать силу до 1000 Н с погрешностью не более 25 Н. После внедрения ДУ количество приводов с развиваемой силой менее 400Н уменьшилось в 2,5 раза, что обеспечило значительное снижение числа отказов ТМ. Суммарное время восстановления за период наблюдений снизилось со 100 до 2 часов. Время наработки на отказ, соответственно, увеличилось со 100 часов до 400 часов (рис. 9).

Модернизация станка ТПАРМ-100 путем объединения двух трехступенчатых ФП в один блок показала возможность получения передаточного коэффициента 6 мкм/об при передаточном отношении фрикционного редуктора 1/10000 (рис. 10). В указанной комплектации была достигнута точность движений суппортов станка до 0,01 мкм.

Предлагается обоснованный алгоритм работы и переменная структура системы управления шаговым приводом подачи автоматизированного прецизионного станка с МФП, сочетающие замкнутое и разомкнутое управление с распределением задачи достижения точности перемещения между датчиком обратной связи и вычислительным управляющим устройством. На рис. 12 показан принцип действия такой системы. Суппорт с помощью замкнутой системы предварительного позиционирования с определенной дискретностью устанавливается на одну из дискретных позиций (N_i) и далее в разомкнутом режиме с меньшей дискретностью доводится до требуемой точки X .

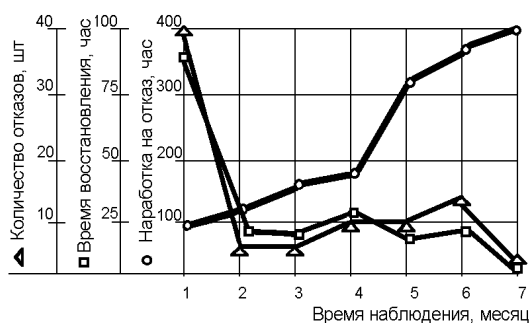


Рис. 9. Изменение значений параметров надежности модулей, связанных с приводом

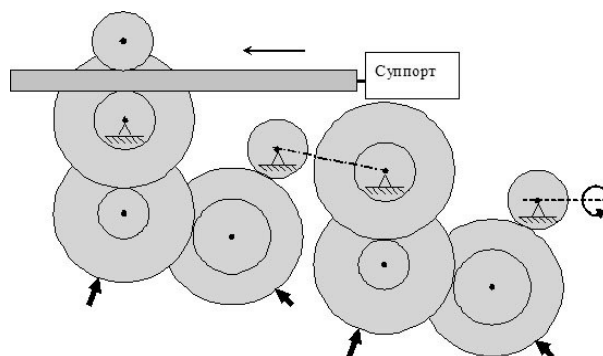


Рис. 10. Схема модифицированного привода поперечной подачи электроискрового станка на базе ТПАРМ

Системой мониторинга в процессе движения собирается информация о фактическом соотношении заданного и отработанного перемещений (скольжении) в моменты прохождения дискретных позиций N_i под контролем обратной связи. При определении управляющего воздействия в разомкнутом режиме используются измеренные значения. Эти значения с определенной достоверностью соответствуют фактическим значениям в данный момент времени. Чем измеренные значения ближе к точке позиционирования X (рис. 11), тем они достовернее. Чем их больше, тем ниже вероятность выбросов. Оптимизация количества учитываемых измерений – одна из задач системы управления и контроля. Эта задача решается как при проектировании системы управления, так и при эксплуатации станка в процессе выполнения алгоритма управления. Использование МФП в сочетании с ШД обеспечивают высокую динамическую точность в реверсивном режиме работы прецизионных станков.

Функциональная схема системы, реализующий предложенный принцип управления, приведена на рис. 12. Блок управления на основе данных, поставляемых блоком мониторинга, генерирует управляющие шаговым двигателем сигналы, обеспечивая предварительное позиционирование и доводку. Используя возможности микрошагового режима шагового двигателя, доводка может позиционировать суппорт с достаточно высокой точностью (сотые доли микрометра).

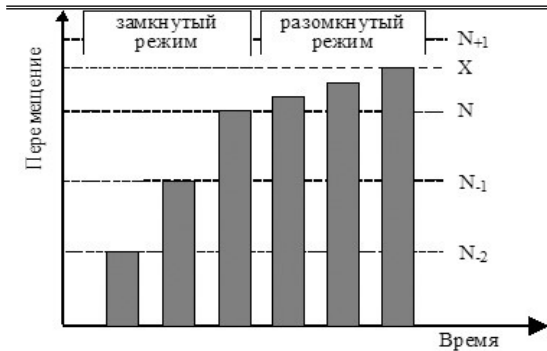


Рис. 11. Принцип работы системы с переменной структурой управления

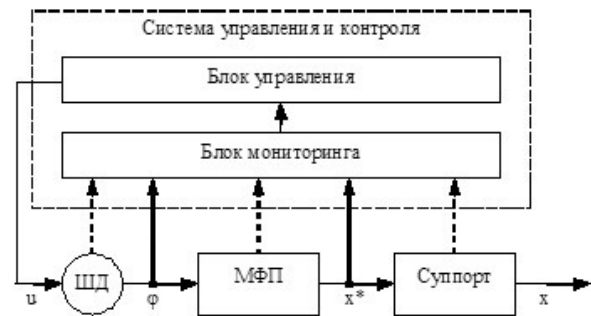


Рис. 12. Функциональная схема управления привода с шаговым двигателем и фрикционной передачей

Экспериментальная проверка возможности обеспечения сверхпрецизионной точности формообразующих движений рабочих органов автоматизированных станков на основе привода с МФП проводилась на модернизированном модуле ТПАРМ, используемом для электроискровой обработки. В качестве привода подачи была использована шестиступенчатая ФП, изготовленная путем объединения двух трехступенчатых ФП с общим передаточным отношением 10000.

Таким образом, задача повышения управляемости приводов подачи и достижения точности прецизионных станков смещается на вычислительные элементы системы управления. Смещение функции достижения точности в сторону усложнения управления (обработки информации) соответствует современным тенденциям развития машиностроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатъев А.А. Методология анализа формирования параметров точности прецизионной обработки на этапах жизненного цикла станка / М.В. Виноградов, А.А. Игнатъев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 1 (52). С. 41-49.
2. Виноградов М.В. Математический анализ взаимодействия сил в трехступенчатой фрикционной передаче / М.В. Виноградов, А.А. Павлов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2008. № 3 (34). С. 14-19.
3. Виноградов М.В. Привод подачи с многоступенчатой фрикционной передачей для прецизионного токарного модуля / М.В. Виноградов, А.А. Игнатъев, Е.А. Сигитов // СТИН. 2004. №11. С. 11-12.
4. Виноградов М.В. Обеспечение нанометровой точности формообразующих перемещений рабочих органов прецизионных автоматизированных станков / М.В. Виноградов, А.А. Игнатъев, Е.А. Сигитов. Саратов: Изд-во СГТУ. 2011. 102 с.
5. Игнатъев А.А. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков: в 3 ч. Ч. 3 / А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, М.В. Виноградов и др. Саратов: СГТУ, 1999. 124 с.
6. А.с. 1144774. Токарный станок / И.Р. Зацман, Л.И. Брук, С.И. Зайцев и др. // Открытия. Изобретения, 1985. № 10.

Виноградов Михаил Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Vinogradov Michael Vladimirovich – Cand.Tech.Sci.,
The senior lecturer of chair «Automation and control of technological processes»
The Saratov state technical university

Игнатъев Александр Анатольевич –

Ignatyev Alexander Anatolevich –

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

Dr.Sci.Tech., the professor,
Managing chair «Automation and manage-
ment of technological processes»
The Saratov state technical university

Сигитов Евгений Александрович –
кандидат технических наук,
директор ЗАО «НПК Прецизионного
оборудования»

Sigitov Evgenie Aleksandrovich –
Cand.Tech.Sci.,
Director ЗАО НПК ПО

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 658.52.011.56.012: 681.5

В.А. Добряков

КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАНКОВ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Представлен разработанный автоматизированный информационно-измерительный канал контроля виброакустических характеристик, по которым определяется динамическое состояние металлорежущих станков. Обоснована аппаратная и программная обработка виброакустических сигналов. Приведено описание направлений реализации измерительной аппаратуры, среди которых центральное место занимает система мониторинга технологического процесса обработки высокоточных деталей машино- и приборостроения.

Информационно-измерительный канал, металлорежущий станок, виброакустические характеристики, автокорреляционная функция, технологическая система станка, интегральная оценка, система мониторинга технологического процесса, динамическая балансировка

V.A. Dobryakov

CONTROL OF THE DYNAMIC CONDITION OF MACHINES IN SYSTEM OF MONITORING OF TECHNOLOGICAL PROCESS

The developed automated information and measuring channel of control of vibroakustichesky characteristics by which the dynamic condition of metal-cutting machines is determined is presented. Hardware and program processing of vibroakustichesky signals is proved. The description of the directions of realization of measuring equipment among which the central place is occupied by system of monitoring of technological process of processing of high-precision details machine and instrumentation is provided.

Information and measuring channel, metal-cutting machine, vibroakustichesky characteristics, autocorrelation function, technological system of the ma-

chine, integrated assessment, system of monitoring of technological process, dynamic balancing

Динамическое состояние МРС на одно из основных показателей его качества определяет выходные показатели технологической системы станка (ТСС). Контроль этого состояния с позиций вибродиагностики МРС позволяет формировать данные о его техническом состоянии на самом высоком уровне структуры объекта, что особенно важно при диагностировании прецизионного технологического оборудования. Используя методы вибродиагностики, рассмотренные в [1], оценивание динамического состояния МРС целесообразно производить не только по традиционным характеристикам виброакустических (ВА) колебаний узлов формообразующей подсистемы (амплитуда и частота различных гармонических составляющих), так как они не всегда позволяют объективно и оперативно проанализировать динамические характеристики при диагностировании состояния станков, но и по функционалам, формируемым, например, из стохастических характеристик ВА колебаний, использующих, в частности, их автокорреляционную функцию (АКФ) [2]. В работе [2] убедительно показано, что ВА сигнал, генерируемый на МРС при резании, представляет собой широкополосный стохастический процесс, спектр которого изменяется в зависимости от режимов резания и динамического состояния ТСС. С этих позиций рассмотрим формирование эффективной диагностической оценки МРС.

Учитывая подход к моделированию станка как динамического объекта [2, 3], его динамическое состояние описывается векторно-матричным дифференциальным уравнением

$$M\ddot{X}(t) + H\dot{X}(t) + CX(t) = F(t), \quad (1)$$

где M , H , C – матрицы коэффициентов инерции, демпфирования и жесткости $n \times n$ соответственно; $\ddot{X}(t)$, $\dot{X}(t)$, $X(t)$ – векторы ускорения, скорости и перемещения системы размерности n соответственно; $F(t)$ – вектор возмущающих сил размерности $l(l \leq n)$.

Вектор возмущающих сил в общем случае

$$F(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t). \quad (2)$$

В сумму (2) при стационарном резании входят сила резания, внешняя периодическая сила от дисбаланса вращающихся деталей в функциональных узлов станка, например, сила от дисбаланса шпинделя с патроном и другие составляющие, в том числе и случайная, в виде стационарного случайного процесса типа «белый шум».

Исходный регистрируемый ВА процесс $X(t)$ на МРС можем записать в виде суммы детерминированной $\tilde{X}(t)$ и случайной $\overset{\circ}{X}(t)$ составляющих

$$X(t) = \tilde{X}(t) + \overset{\circ}{X}(t) \quad (3)$$

Рассмотрим формирование вибродиагностических процедур при обработке на МРС. Каждому технологическому режиму обработки соответствует определенный характер колебательных процессов как в зоне резания, так и элементов конструкции который определяются динамикой взаимодействия резца с деталью и функционированием (взаимодействием) узлов станка. Последнее обусловлено динамическим состоянием самого станка. При этом, считая процесс резания при неизменном технологическом режиме в течение не которого времени на одном проходе стационарным, на этом интервале времени определяют АКФ $R_{xx}(\tau)$:

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) \cdot x(t - \tau) dt \quad (4)$$

где τ – временной сдвиг.

Тогда АКФ процесса можно записать в виде

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\tilde{X}(t) + \dot{X}(t) \right] \left[\tilde{X}(t+\tau) + \dot{X}(t+\tau) \right] dt \quad (5)$$

Путем преобразований, учитывая независимость процессов $\tilde{X}(t)$ и $\dot{X}(t)$, получаем

$$R_{xx}(\tau) = R_{\tilde{xx}}(t) + R_{\dot{xx}}(\tau) \quad (6)$$

Учитывая, что колебательный процесс являясь решением уравнения (1), в простейшем виде может быть представлен моногармоническими колебаниями

$$\tilde{X}(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

получим

$$R_{\tilde{xx}}(\tau) = \frac{A^2}{2} \cos \omega \tau. \quad (8)$$

В случае, если $\tilde{X}(t)$ – полигармонический колебательный процесс, который может быть представлен в виде суммы нескольких моногармонических колебаний с частотами, находящимися между собой в рациональном отношении

$$\tilde{X}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (9)$$

где $\omega_k = \frac{2\pi}{T} k$, то

$$R_{\tilde{xx}}(\tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_k^2}{2} \cos \omega_k \tau \quad (10)$$

Таким образом при наличии гармонических колебаний в исходном спектре ВА колебаний ТСС АКФ содержит гармоническую составляющую и характеризует спектральные свойства ВА сигнала (амплитуду и частоту). Подробный анализ сущности и информативности метода (по динамическому качеству МРС) проведен в работе [2]. Поскольку известные методы оценок по стохастическим характеристикам ВА колебаний, например, по спектральным функциям, функциям когерентности и другим [4] не позволяют дать быструю эффективную оценку динамического состояния станка, было предложено применить для этой цели функционал, формируемый из АКФ ВА колебаний ТСС при резании [5], представляющий собой свертку корреляционной функции, основанную на интегральных методах В.С.Кулебакина-А.А.Фельдбаума [6].

$$I = \int_0^t \left[R_{xx}^2(\tau) + \alpha_1 \dot{R}_{xx}^2(\tau) + \alpha_2 \ddot{R}_{xx}^2(\tau) \right] dt, \quad (11)$$

где α_1, α_2 – весовые коэффициенты; $[0, t]$ – отрезок времени, на котором производится интегрирование; $R_{xx}(\tau), \dot{R}_{xx}(\tau), \ddot{R}_{xx}(\tau)$ – АКФ, ее первая и вторая производные соответственно.

Формула (11), представляющая собой интегральную оценку АКФ регистрируемых ВА колебаний, позволяет получить численную характеристику динамического состояния станка, что является достоинством данного метода и обеспечивает применение (11) в качестве решающего правила при вибродиагностике МРС различного назначения.

Кроме указанной формулы для построения алгоритма диагностирования могут также использоваться различные линейные комбинации слагаемых в подинтегральном выражении (11), позволяющие учесть информацию о колебательности или апериодичности функции $R_{xx}(\tau)$.

С точки зрения оперативности и эффективности диагностирования хорошие показатели обеспечивает оценка вида

$$I = \int_0^t \left[R_{xx}(\tau) \right]^2 d\tau \quad (12)$$

В работе [2] методом компьютерного моделирования построены некоторые типичные графики $R(\tau)$ для различного вида колебательных ВА процессов, начиная от гармониче-

ского и кончая случайным. Сравнительный анализ АКФ показывает, что наиболее благоприятными с точки зрения режимов прецизионной обработки (стойкости РИ и микрогеометрии обрабатываемой поверхности) являются динамические состояния ТСС с минимальными значениями интегральных оценок АКФ. С этих позиций идеальным динамическое состояние МРС будет тогда, когда зарегистрированные ВА колебания МРС при стационарном резании представляют собой максимально широкополосный случайный шум, т.е. должны быть близки к процессу типа «белый шум», при этом обеспечивается минимум интегральной оценки (11) или максимум динамического качества МРС [5].

Практическая реализация предложенного метода вибродиагностики, включающая автоматизированную обработку данных о ВА колебаниях и вычисление интегральных оценок АКФ, защищена авторским свидетельством №1750925 [6] и подробно изложена ниже.

Система контроля динамических характеристик МРС, представленная в виде информационно-измерительного канала (ИИК) на рисунке, разработана в СГТУ [5, 6]. Основным ее достоинством является применение ряда метрологически аттестованных стандартных приборов, выпускаемых промышленностью, и возможность стыковки с верхним уровнем (ВУ) управления в качестве информационного канала, например, системой мониторинга технологического процесса, что обеспечивает высокую достоверность получаемой контрольной и диагностической информации [1].

В состав ИИК для контроля динамического состояния оборудования входят:

- виброизмерительный прибор ВШВ-003-М3 в комплекте с датчиком виброускорения ДНЗ-М1 и предусилителем вибросигнала;
- компьютер типа Ноутбук, укомплектованный платой АЦП и соответствующим программным обеспечением.

Вибродатчик ДНЗ-М1 виброизмерительного прибора ВШВ крепился на станочном объекте с помощью магнитного основания.

Сигнал с датчика, пропорциональный виброускорению, через предусилитель подавался в измерительный блок прибора ВШВ-003, где регистрировался в режиме «ЛИН» в частотном диапазоне от 1 Гц до 4 кГц.

С аналогового выхода прибора вибросигнал поступал на АЦП для преобразования в цифровую форму и ввода в компьютер, в котором производилась обработка сигнала по специальной программе на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ).



Структура ИИК динамического состояния оборудования

На экран монитора компьютера в режиме реального времени выводилась спектрограмма, по которой по первому программному модулю вычислялась интегральная оценка, характеризующая общее динамическое состояние МРС. По второму программному модулю вычислялась АКФ от временной характеристики по описанной выше методике, позволяющая определить частную оценку динамического качества станка.

Перед проведением испытаний с помощью тарировочного вибростенда фирмы RFT (Германия) производилась калибровка ИИК, включающего датчик, предусилитель, прибор и компьютер.

В процессе исследований вибродатчик, устанавливаемый как можно ближе к зоне резания, например, на резцовом блоке токарного станка, предназначен для выделения сигнала, про-

порционного виброускорению в диапазоне 2...4000Гц. В качестве датчика использовался пьезоэлектрический акселерометр, входящий в комплект виброизмерителя ВШВ-003-М3, который усиливал сигнал виброускорения до уровня 0,1-0,2 В. Далее сигнал поступал интегратор, встроенный в виброизмеритель; и предназначенный для получения сигналов о виброскорости. С выхода интегратора ВА сигнал подавался, на АЦП, с выхода которого после преобразования появлялся цифровой код, содержащий информацию о дискретных значениях ВА процесса. Этот код поступал для запоминания и обработки в компьютер типа Ноутбук. В нем производилось интегрирование массива данных, строился спектр ВА колебаний и вычислялась АКФ. По максимальному значению АКФ при нулевом сдвиге и подсчитывались интегральные оценки, полученные при резании в течение каждого прохода резца по поверхности обрабатываемой детали. Программное обеспечение составляла программа сбора информации и расчета интегральных оценок АКФ и спектра ВА колебаний ТСС.

По пронормированному массиву исходных данных при необходимости находились массивы первой и второй производных, затем по каждому из массивов вычислялись интегральные оценки. Для удобства анализа распечатки массива интегральных оценок предусматривались три режима, соответствующие виду исходного процесса (виброускорения, виброскорость, виброперемещение), с их циклической сменой. Программа позволяла также строить график кривой исходной АКФ. Программа заканчивалась перебором значений интегральных оценок АКФ, полученных при различных режимах резания, и выделялось минимальное значение оценок соответствующее лучшему динамическому качеству и оптимальному режиму, например, по шероховатости поверхности и стойкости РИ.

Примером диагностирования динамического качества МРС может служить регистрация ВА колебаний ТСС и вычисление реальных АКФ с помощью ИИК при точении на станках 1А616, ТПК-125, ТПАРМ-100М и других. ВА колебания ТСС, служившие исходной информацией для получения АКФ, регистрировались датчиком, установленным на резцовом блоке станка с помощью магнитного основания, а затем обрабатывались по алгоритмам, описанным выше. Величина (минимум) интегральной оценки АКФ объективно показывало лучшее динамическое качество, что подтверждалось сопоставлением с результатами, полученными другим методом вибродиагностики [3, 4], т.е. обеспечивало достоверное диагностирование динамического состояния станка.

Для проверки возможностей предложенного метода по оптимизации режима резания по параметру шероховатости выполнены многочисленные исследования на станках 1А616 и токарных модулях гаммы ТПАРМ, в которых достоверно подтверждена связь между изменением интегральных оценок АКФ ВА колебаний и параметром шероховатости поверхности обработанных деталей при варьировании вылета резца, подачи, припуска и скорости вращения шпинделя [2, 5, 6].

Таким образом, разработанный метод позволяет по интегральным оценкам АКФ ВА колебаний ТСС при стационарном резании не только производить количественную оценку, представляющую собой решающее правило для диагностирования динамического качества станка, но и оптимизировать режим резания, в частности по шероховатости поверхности, критерием чего служит минимум указанных интегральных оценок.

По величине интегральных оценок от огибающей спектра сигнала оценивалось общее динамическое состояние оборудования. Значения этих оценок являются критерием динамического качества станка. Полученная информация может быть передана в информационно-вычислительную сеть предприятия с помощью системы мониторинга технологического процесса и выведена на верхний уровень (ВУ) управления предприятием, например в АСУП.

Кроме того, реализованный ИИК успешно применялся на балансировочном станке МС9Г717 [7], на котором по разработанной методике производилась высокоточная динамическая балансировка, крупногабаритных роторов электродвигателей тягового состава железной дороги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добряков В.А. Формализация оценки технического состояния станков как объектов контроля, диагностирования и испытаний / В.А. Добряков // Вестник Саратовского государственного технического университета. Саратов: СГТУ, 2011. №2 (56). Вып.2. С. 45-52.
2. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков. Ч.2 / Б.М. Бржозовский, В.А. Добряков, А.А. Игнатъев, В.В. Мартынов. Саратов: СГТУ, 1994. 156 с.
3. Карасев В.А. Доводка эксплуатируемых машин. Вибродиагностические методы / В.А. Карасев, А.Б. Райтман. М. Машиностроение, 1986. 192 с.
4. Добрынин В.А. Методы автоматизированного исследования вибраций машин: Справочник / В.А. Добрынин, М.С. Фельдман, Г.И. Фирсов. М. Машиностроение. 1987. 224 с.
5. Игнатъев А.А. Динамические испытания прецизионных токарных модулей / А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, В.В. Куранов // Известие вузов. Машиностроение. 1992. №4-6. С. 98-101.
6. Авторское свидетельство № 1750925. Способ управления обработкой резанием / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, В.В. Куранов // Открытие. Изобретение. 1992. № 28.
7. Добряков В.А. Высокоточная балансировка крупногабаритных деталей типа «ротор» по параметрам вибрации / В.А. Добряков, М.В. Виноградов, С.С. Пчелинцев // Автоматизация и управление в машино и приборостроении: межвуз. науч.сб. Саратов: СГТУ. 2000. С. 43-45.

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 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 537.528

Т.А. Ефремова

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОМ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ КАК СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Проведен расчет скорости жидкости в кювете электрогидравлического преобразователя импульсного действия как системы с распределенными параметрами. На основе уравнения Навье-Стокса проведен подбор уравнения, определены начальные и граничные условия, получены статическое распределение скорости в кювете, а также передаточная функция преобразователя по скорости жидкости при ЭГД-воздействии.

Электрогидравлический преобразователь, расчет скорости, передаточная функция

Т.А. Efremova

CALCULATION OF THE RATE OF FLOW OF LIQUID ELECTROHYDRAULIC PULSES AS A SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

We calculated the velocity of the fluid in the cell electro-th transducer pulsed as a system with distributed parameters. On the basis of the Navier-Stokes held under-boron equation defined initial and boundary conditions, obtained a static distribution of the velocity in the cell, as well as the transfer function of the converter on the fluid velocity in the EHD effect.

The cell electro-th transducer, calculated the velocity, the transfer function

Электрогидравлические удары способны весьма эффективно и быстро смешивать между собой в виде высокодисперсных эмульсий самые разнообразные вещества, которые затем могут долгое время не расслаиваться. Достижимая дисперсность эмульсий зависит как от свойств самих смешиваемых компонентов, так и от «энергий», затраченной на изготовление эмульсии, а при заданной энергии импульса – от времени обработки ее воздействием электрогидравлического эффекта. Эмульсии двух или нескольких несмешивающихся жидкостей могут быть получены различными способами, каждый из которых осуществляется с помощью специального устройства [1].

Для того чтобы получить процесс смешивания воды и диэлектрика под действием электростатического поля, необходимо на одном из электродов получить коронный разряд.

Данный метод можно реализовать в электрогидродинамическом – устройстве с высоковольтными электродами острие – плоскость конструкция и принцип работы устройства описан в [2]. Результаты экспериментальных исследований электрогидравлического преобразователя импульсного действия получены в работах [2, 3].

Для расчёта основных параметров турбулентных течений используют уравнение Навье-Стокса [1]:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \cdot \vec{v} - \nu \Delta \vec{v} = -\frac{1}{\gamma} \nabla P + \frac{1}{\gamma} \rho \vec{E}, \quad (1)$$

где γ – плотность жидкости, $\gamma=10^3$, кг/м³; ρ – плотность объемного заряда, $\rho = -\varepsilon_{\text{воды}} \varepsilon_0 \vec{E} \nabla \ln \sigma$, Кл/м³; E – внешнее электрическое поле, $E=10^6$, В/м; ε – диэлектрическая проницаемость жидкости, $\varepsilon_{\text{воды}} = 81$; ε_0 – электрическая постоянная, $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м.

В выражении (1) вынесем вектор скорости за скобку, применим к правой и левой частям операцию модуля, принимая во внимание, что модуль вектора представляет собой скаляр и распишем, оператор Гамильтона уравнение (1) примет вид:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial v}{\partial z} - \nu \Delta v = a(t) \quad (2)$$

$$\text{где } a(t) = -\frac{1}{10^3} \nabla P - \frac{1}{10^3} 81 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} E^2 \nabla \ln \sigma \quad (3)$$

Получили уравнение в частных производных. Перейдём от декартовых координат к цилиндрическим, так как рабочая область кюветы ЭГПВД имеет форму цилиндра:

$$v(x, y, z) = v^*(r, \varepsilon, z) \quad (4)$$

Подставляя полученные выражения в производные для компонентов скорости и учитывая, что решение будет находиться в независимости от угла ε , получим:

$$\frac{\partial v^*}{\partial t} - v \frac{2}{r} \frac{\partial v^*}{\partial r} - v \frac{\partial^2 v^*}{\partial r^2} = a(t) \quad (5)$$

где $t > 0$, $0 \leq r \leq b$; граничные условия: $v_{r=0}$, $v_{r=b}$.

Тогда решение будет искажаться внутри области ограниченной прямыми $\rho = 0$ и $\rho = b$, где $b=0,024$ мм – соответствует значению r при максимальных значениях координат x и y . В начальный момент времени жидкость покоится, то есть её скорость равна нулю.

Процессы, происходящие при высоковольтном разряде в кювете, приводят к тому, что скорость жидкости в каждой точке пространства рабочей области будет иметь свое значение. Поэтому будем считать, что скорость жидкости распределена в цилиндрической системе координат и зависит от положения пространственной переменной r .

В качестве выходной функции в нашем случае является скорость жидкости $v(r,t)$. Поэтому дифференциальное уравнение (4) переписывается в виде:

$$\frac{\partial v(r,t)}{\partial t} - a^2 \left[\frac{\partial^2 v(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial v(r,t)}{\partial r} \right] = f(r,t) \quad (6)$$

В последнем выражении входной величиной является напряжение (B), выходной – скорость жидкости (m/c). Выравним размерности правой и левой частей равенства (6):

$$\frac{M}{c^2} - a^2 \left(\frac{M}{cm^2} + \frac{M}{cm^2} \right) = B,$$

где a^2 – кинематическая вязкость (m^2/c).

$$\text{Следовательно } \frac{M}{c^2} - \frac{M^2}{c} \cdot \frac{1}{M \cdot c} = B; \quad \frac{M}{c^2} = b \cdot B.$$

Необходимо подобрать такой коэффициент преобразования b с некоторой размерностью, чтобы правая часть уравнения имела размерность левой:

$$b = \frac{Kл}{M \cdot K^2}.$$

С учетом полученного коэффициента входное воздействие будет определяться в виде:

$$f(r,t) = U \frac{q}{m \cdot r} \cdot \Delta(t), \quad (7)$$

где U – напряжение, B ; q – заряд частицы, Кл; m – масса частицы, кг; r – радиус частицы, м.

В последнем выражении $\Delta(t)$ означает, что на вход подается импульсное напряжение. Согласно уравнению в частных производных (6) выберем дифференциальное уравнение из [4]:

$$\frac{\partial Q(r,t)}{\partial t} - a^2 \left[\frac{\partial^2 Q(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial Q(r,t)}{\partial r} \right] = f(r,t), \quad (8)$$

$$Q(r,0) = Q_0(r), \quad r \geq 0, t \geq 0, a \neq 0,$$

где $Q(r,t)$ – функция от независимых переменных, выходная функция; $f(r,t)$ – произвольная функция из определенного класса от независимых переменных, входная функция; r, t – независимые переменные. Стандартизирующая функция имеет вид [4]:

$$\omega(r,t) = f(r,t) + v_0(r) \cdot \Delta(t) \quad (9)$$

Так как из начальных условий $v_0(r) \Delta(t) = 0$, то $\omega(r,t) = f(r,t) = \omega(\rho, \tau)$

Функция Грина определяется выражением [4]:

$$G(r,\rho,t) = \frac{1}{8\pi a \sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{r\rho\sqrt{t}} \cdot \left(\exp\left(-\frac{(r-\rho)^2}{4a^2t}\right) - \exp\left(-\frac{(r+\rho)^2}{4a^2t}\right) \right) \quad (10)$$

Разложив функцию Грина в ряд Тейлора, определим функцию поверхности распределенной в пространстве координат скорости как двойной интеграл от произведения функции Грина на нормирующую функцию $1/4$. Решив полученный интеграл с помощью пакета программ MathCad Enterprise 14, получим:

$$v(r, t) = \frac{0,2 \cdot 10^{-25} + 0,2 \cdot 10^{-21} r^2 + 0,3 \cdot 10^{-18} r^4 - 0,4 \cdot 10^{-15} t + 0,2 \cdot 10^{-4} t^2 - 0,2 \cdot 10^{-11} t r^2}{t^{7/2}} \quad (11)$$

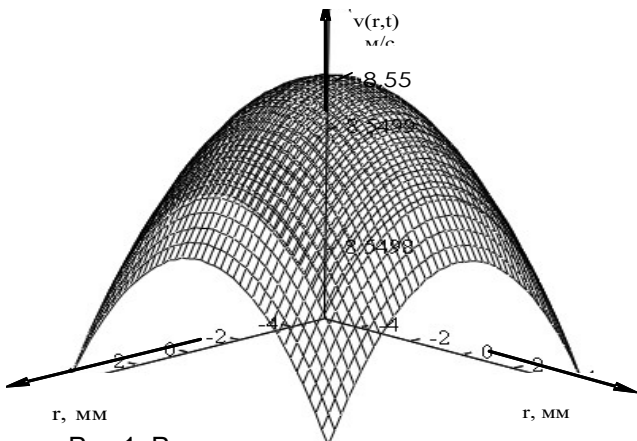


Рис.1. Распределение скорости жидкости в кювете ЭГИД

Трёхмерное изображение распределения скорости получено на рис.1.

Для нахождения динамической характеристики и построение переходного процесса. Определим интегральную передаточную функцию как пространственную композицию от произведения непрерывной передаточной функции $W(r, \rho, p)$ и преобразованной по Лапласу стандартизирующей функции с выделенным из неё входным воздействием – $\tilde{\omega}_1(\rho, p)$, в которой выходная переменная r заменена на входную переменную ρ [4]. Непрерывная передаточная функция имеет вид [4]:

$$W(r, \rho, p) = \frac{1}{8\pi a} \cdot \frac{1}{r\rho\sqrt{p}} \cdot \left[e^{-\frac{\sqrt{p}(r-\rho)}{a}} - e^{-\frac{\sqrt{p}(r+\rho)}{a}} \right] \quad (12)$$

Проведя промежуточные расчеты, получено выражение для интегральной передаточной функции:

$$W_f(r, p) = \int_0^r \frac{1}{8\pi a} \cdot \frac{1}{r\rho\sqrt{p}} \cdot \left[e^{-\frac{\sqrt{p}(r-\rho)}{a}} - e^{-\frac{\sqrt{p}(r+\rho)}{a}} \right] \cdot 24 \cdot 10^7 d\rho \quad (13)$$

Решив полученный интеграл с помощью пакета программ MathCad Enterprise 14, получим интегральную передаточную функцию ЭГИД:

$$W_f(p) = \frac{8,3 \cdot \sqrt{p} - 1,35 \cdot 10^{-4} \cdot p}{\sqrt{p}} \quad (14)$$

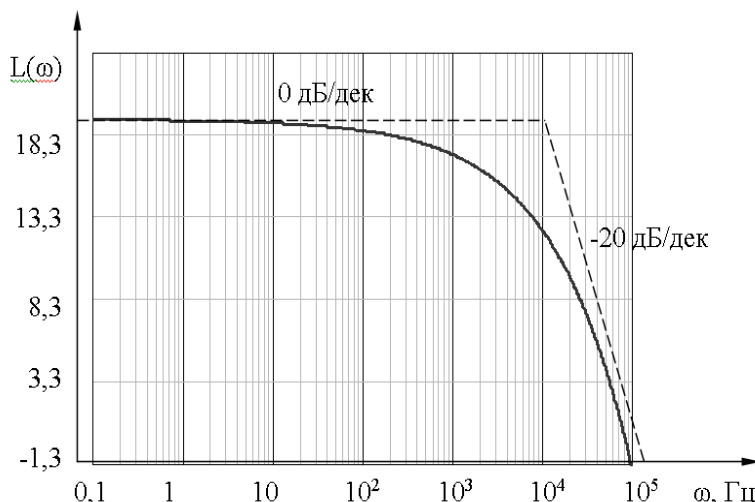


Рис.2. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика ЭГИД

Для получения истинной передаточной функции для выражения (14) построена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (рис.2.), аппроксимировав полученную кривую стандартными типовыми наклонами можно записать передаточную функцию ЭГИД.

По ЛАЧХ видно, что данное звено представляет собой апериодическое звено первого порядка с наклоном -20 дБ/дек, передаточная функция которого имеет вид:

$$W_{an}(p) = \frac{8,32}{1,28 \cdot 10^{-4} p + 1}$$

Полученные коэффициент усиления и постоянная времени совпадают с теоретическими исследованиями и соответствуют физике процесса перемешивания при электрогидравлическом воздействии на жидкость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. М.: Наука, 1970. 904 с.
2. Ефремова Т.А. Экспериментальные исследования влияния емкости конденсаторной батареи на параметры эмульсий, приготовленных в ЭГПВД / Т.А. Ефремова // Проблемы прочности, надежности и эффективности: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2007. 304 с.
3. Ефремова Т.А., Власов В.В., Власов А.В. Экспериментальные исследования предельных параметров струи жидкости, образованной в кювете ЭГПВД / Т.А. Ефремова, В.В. Власов, А.В. Власов. Балак. инст. бизнеса и управ. Балаково, 2005. Деп. в ВИНТИ 26.12.05, №1733-В2005. 9 с.
4. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. М.: Наука, 1979. 224 с.

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

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 004.891

А.В. Каракозова, А.А. Игнатъев

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

Представлены подходы, реализующие контроль динамического состояния станков по виброакустическим (ВА) колебаниям. Представлен образец экспертной системы контроля динамического состояния шлифовального станка.

Экспертная система, шлифование, виброакустические колебания

A.V. Karakozova, A.A. Ignatyev

USE OF EXPERT SYSTEMS FOR DYNAMIC CONTROL OF GRINDING MACHINES

Approaches that implement dynamic control of the state machines of vibroacoustic (VA) fluctuations. A sample of the expert system controls the dynamic state of the grinding machine.

Expert systems, grinding, vibroacoustic oscillations

Искусственный интеллект, как научная дисциплина, состоит из нескольких крупных течений. Одно из них – экспертные системы [1, 2].

Экспертные системы имеют одно большое отличие от других систем искусственного интеллекта: они не предназначены для решения каких-то универсальных задач, как например

нейронные сети или генетические алгоритмы. Экспертные системы предназначены для качественного решения задач в определенной разработчиками области, в редких случаях – областях. Ценность всей экспертной системы как законченного продукта на 90% определяется качеством созданной базы знаний.

На сегодняшний день создано уже большое количество экспертных систем. С помощью них решается широкий круг задач, но исключительно в узкоспециализированных предметных областях. Как правило, эти области хорошо изучены и располагают более менее четкими стратегиями принятия решений. Передача экспертным системам «глубоких» знаний о предметной области является большой проблемой. Как правило, это является следствием сложности формализации эвристических знаний экспертов.

Актуальность автоматизированного контроля процесса шлифования обуславливается тем, что он позволяет не только своевременно выявить нарушения в ходе обработки, но и предотвратить возникновение бракованных деталей.

Экспертная система работает в двух режимах: режиме приобретения знаний и в режиме консультаций (называемом также режимом решения или режимом пользования экспертной системой).

В режиме приобретения знаний общение с экспертной системой осуществляет эксперт. В этом режиме эксперт, используя компонент приобретения знаний, наполняет систему знаниями, которые позволяют экспертной системе в режиме консультаций самостоятельно (без эксперта) решать задачи из проблемной области. Эксперт описывает проблемную область в виде совокупности данных и правил. Данные определяют объекты, их характеристики и значения, существующие в области экспертизы. Правила определяют способы манипулирования с данными, характерные для рассматриваемой области.

В режиме консультации общение с экспертной системой осуществляет конечный пользователь, которого интересует результат и (или) способ его получения. Необходимо отметить, что в зависимости от назначения экспертной системы пользователь может не быть специалистом в данной проблемной области (в этом случае он обращается к экспертной системе за результатом, не умея получить его сам), или быть специалистом (в этом случае пользователь может сам получить результат), но он обращается к экспертной системе с целью либо ускорить процесс получения результата, либо возложить на экспертную систему рутинную работу. Следует подчеркнуть, что термин «пользователь» является многозначным, так как использовать экспертную систему кроме конечного пользователя может и эксперт, и инженер по знаниям, и программист.

В режиме консультации данные о задаче пользователя после обработки их диалоговым компонентом поступают в рабочую память. Решатель на основе входных данных из рабочей памяти, общих данных о проблемной области и правил из базы знаний формирует решение задачи.

На рис.1. представлена классификация ЭС.



Рис. 1. Классификация экспертных систем

По назначению классификацию экспертных систем можно провести следующим образом:

- диагностика состояния систем, в том числе мониторинг (непрерывное отслеживание текущего состояния);
- прогнозирование развития систем на основе моделирования прошлого и настоящего;
- планирование и разработка мероприятий в организационном и технологическом управлении;
- проектирование или выработка четких предписаний по построению объектов, удовлетворяющих поставленным требованиям;
- автоматическое управление (регулирование);
- обучение пользователей и др.

На рис. 2 приведены этапы разработки ЭС [3].

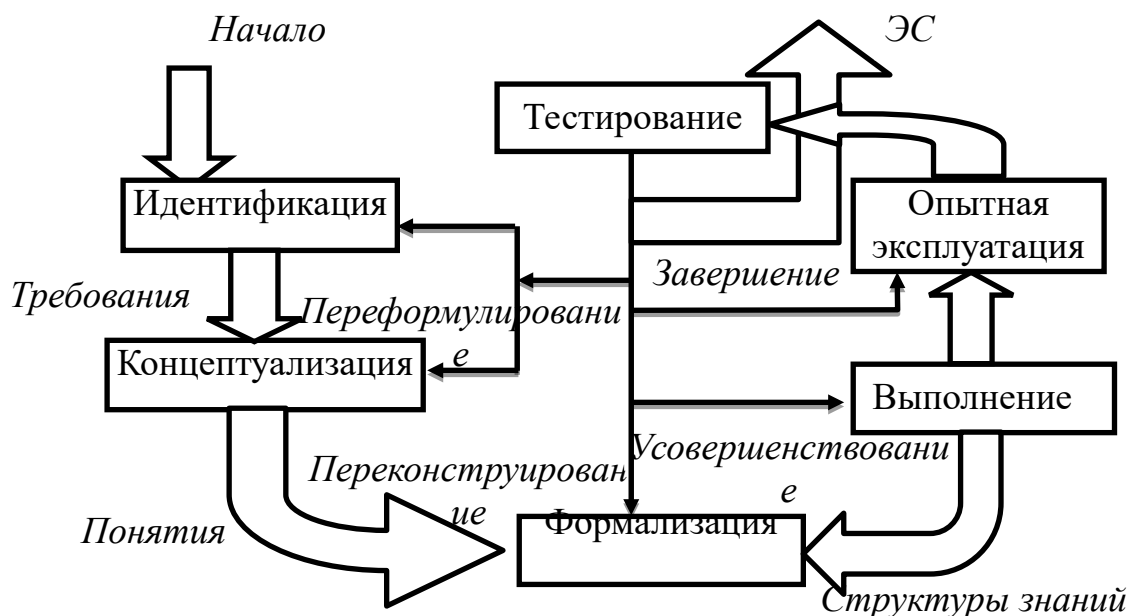


Рис. 2. Этапы разработки экспертной системы

В процессе разработки ЭС должны принимать участие следующие специалисты:

1. Эксперт в той предметной области, задачи которой будет решать ЭС.
2. Инженер по знаниям – специалист по разработке ЭС.
3. Программист, осуществляющий модификацию и согласование инструментальных средств.

Отсутствие среди участников инженера по знаниям (то есть замена их программистами) приводит либо к неудаче процесса разработки, либо значительно удлиняет этот процесс [4].

Ниже показано, как экспертную систему следует использовать для контроля динамического состояния шлифовальных станков.

Результаты исследований, выполненных в условиях реального производства, показывают, что динамическое состояние станков является одним из доминирующих факторов, определяющих качество обработки колец подшипников. Следовательно, на этапе эксплуатации важно осуществлять периодические испытания станков с целью контроля их динамического состояния.

Принципиально возможно два подхода, реализующие контроль динамического состояния станков по виброакустическим (ВА) колебаниям [5]. Первый подход базируется на периодическом контроле выбранного информационного параметра и сравнении его значения с пороговым, полученного 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, с тем, чтобы указать, что значение параметра изменилось, и, соответственно, выходные характеристики станка тоже изменились [6]. Последнее, устанавливается по результатам сравнения текущих значений со значениями, полученными в результате обучающего эксперимента.

Использование второго подхода предполагает оснащение системы активного контроля встроенными вибродатчиками и позволяет регистрировать и накапливать результаты измерений в системе мониторинга технологического процесса (СМТП). Для хранения информации об оборудовании необходима база данных о состоянии оборудования и техно-



Рис. 3. Схема формирования автоматизированной оценки динамического состояния станка

логического процесса. Обработка данных из базы о техническом (динамическом) состоянии оборудования, предполагает связь с базой знаний на основе которой устроена система планирования. Соответственно, при изменении технического состояния станка, как правило, в худшую сторону, необходимо произвести корректировку и технологического процесса (ТП) с целью уменьшения брака выпускаемой продукции (рис.3).

Использование метода автоматизированной оценки динамических характеристик станка по уровню ВА колебаний в комплексе с автоматизированным контролем неоднородности поверхностного слоя шлифованных деталей (рис. 4) не просто увеличивает объем информации о ТП, но и позволяет повысить эффективность управления шлифованием за счет корректировки базы знаний системы планирования.

Для обеспечения эффективности обработки колец подшипников на станках помимо активного контроля размеров, автоматизированного контроля однородности структуры поверхностного слоя дорожек качения необходимо осуществлять автоматизированный контроль динамического состояния каждого станка до и в процессе обработки по уровню вибраций основных формообразующих узлов – шпиндельного узла(ШУ) детали и инструмента, причем следует учитывать не только собственные вибрации шпинделя, но и вибрации подшипников качения.

В общем случае на процесс шлифования действует большое количество возмущающих воздействий, отличающихся по своей природе, по характеру проявления и уровням.

К ним относятся:

- 1) изменения упругих деформаций отдельных узлов ТС по интересующим нас координатам соответственно: станка, приспособления, инструмента и детали;
- 2) температурные деформации отдельных узлов системы;
- 3) изменение физико-механических свойств обрабатываемой детали;
- 4) неточность установки обрабатываемой заготовки;
- 5) изменение состава и расхода СОТС;

6) изменение геометрии обрабатываемой детали (вариации припуска в осевом и радиальном направлениях, разностенность и т.п.);

7) вариации потерь холостого хода и нагрузочных потерь в кинематической цепи станка;

8) вариации скоростей шпинделей шлифовального круга и обрабатываемой детали, соответственно, по причине изменения напряжения сети, питающей электродвигатели шпинделей, и изменения момента сопротивления на валах этих электродвигателей.

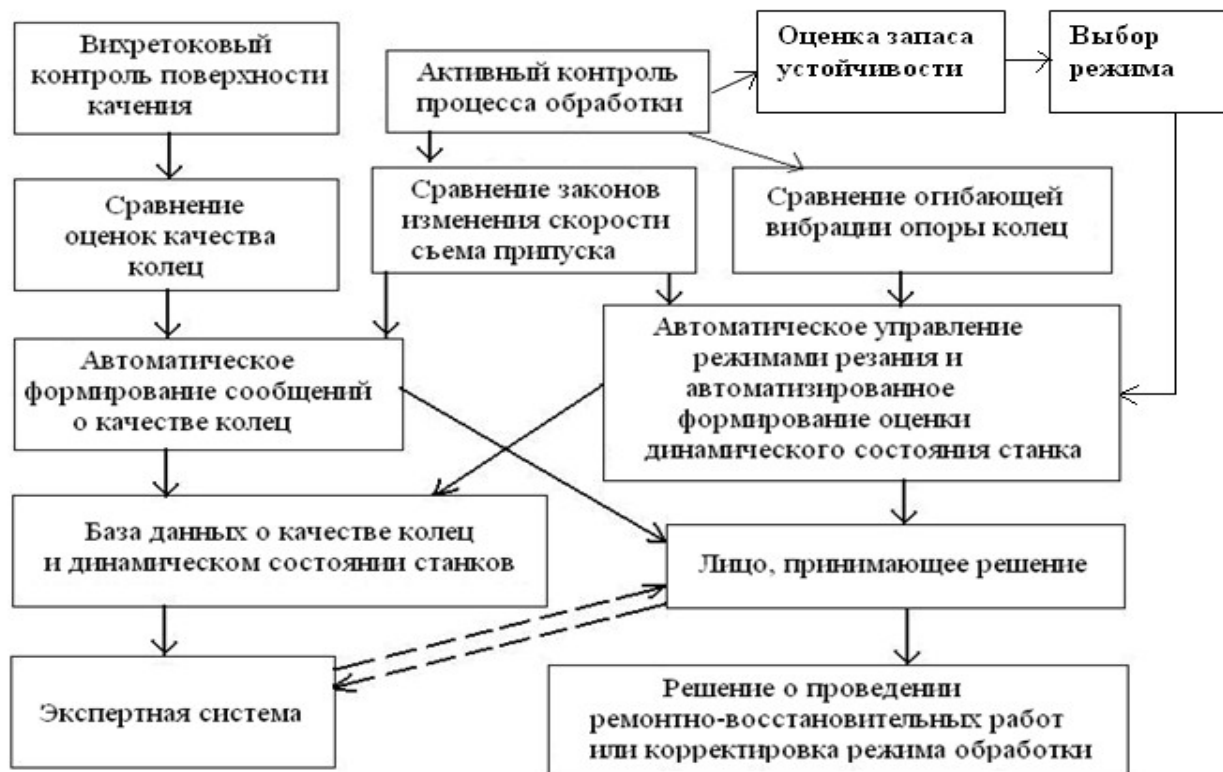


Рис.4. Применение ВА контроля в системе мониторинга для определения рациональных режимов шлифования

По характеру проявления все указанные возмущения можно разбить на постоянно действующие, периодические и случайные. Постоянно действующими возмущениями являются возмущения типа (2) и (3), и др. Они изменяются по определенным закономерностям в зависимости от времени, режима обработки, диаметра шлифовального круга и других факторов.

К случайным возмущениям относятся погрешности в установке заготовок в приспособлении, колебания геометрии и физико-механических свойств заготовок, изменение расхода и состава охлаждающей жидкости и другие. Некоторые из возмущений носят периодический характер: к ним относятся периодические колебания технологических параметров (мощности, затрачиваемой на резание, усилий), связанные с овальностью обрабатываемых заготовок, с неравномерностью скорости продольной подачи и т.д.

Для контроля за динамическим состоянием шлифовального станка используются экспертные системы, которые включаются в систему мониторинга ТП.

Выделение информативных точек съема ВА колебаний и выявления частотных диапазонов, в которых наблюдаются наибольшие характерные отличия спектральных характеристик обоснованно.

Мониторинг ТП должен предусматривать три вида контроля: техническое состояние станков, режим обработки и параметров качества деталей (рис 5.)[7].

Контроль качества функционирования станков непосредственно связан с ходом ТП, определяющего качество шлифования поверхностей качения колец подшипников и включающего в себя макро- и микрогеометрические параметры точности, а также физико-механические свойства поверхностного слоя. Размеры колец и профиль дорожек качения определяются точностью формообразующих перемещений рабочих органов станков, точностью базирования заготовки и точностью профиля шлифовального круга.

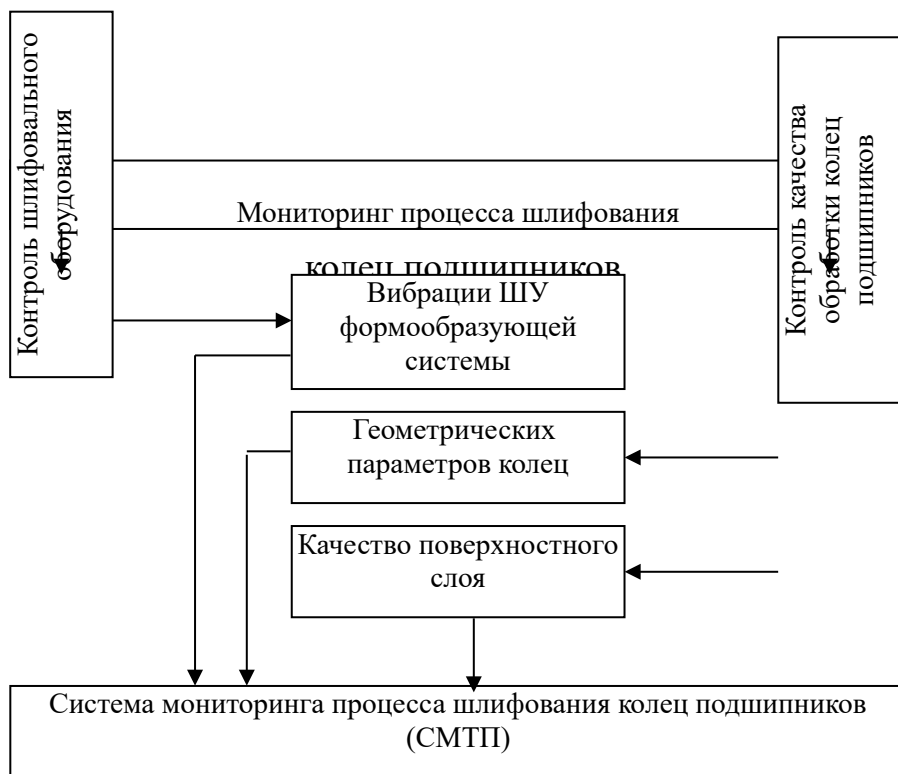


Рис. 5. Обобщенная схема мониторинга техпроцесса

Примеры работы программы

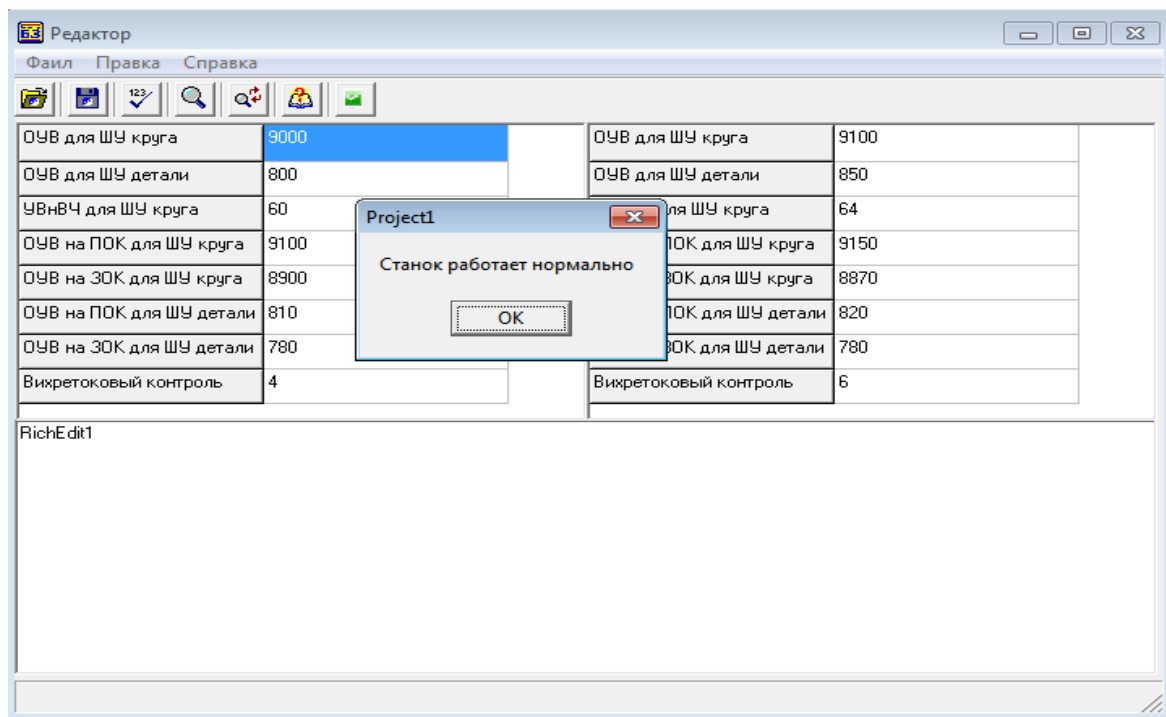


Рис. 6. Показана исправная работа станка

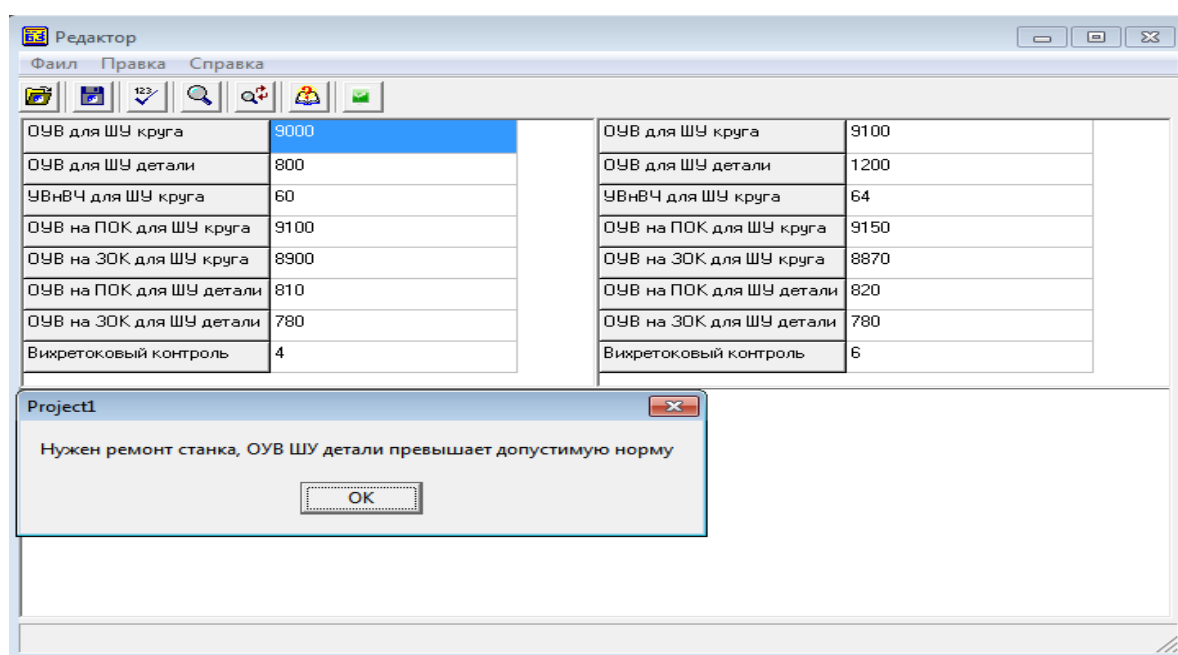


Рис. 7. Показаны рекомендации по использованию станка

По результатам сравнения контролируемых информационных сигналов и эталонных выявляется значимость отклонения и формируется соответствующее сообщение в БДТО, где вся информация накапливается, и программно передаются запросы с обновлением в БД системы планирования. Результатом обработки запросов в БД системы планирования является корректирующее воздействие на технологический процесс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чулюков В. А. Системы искусственного интеллекта. Практический курс: учебное пособие / В.А. Чулюков, И.Ф. Астахова, А.С. Потапов и др. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 292 с.
2. Люгер Д. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. / Д. Люгер. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 864 с.
3. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд. / С. Рассел, П. Норвиг. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1408 с.
4. Экспертные системы. <http://www.aiportal.ru/articles/expert-systems/1/>
5. Барков А.В. Возможности нового поколения систем мониторинга и диагностики /А.В. Барков // Металлург. 1998. № 11. С. 56-59.
6. Васильев Г.Н. Проблемы диагностики и обеспечения надежности металлорежущих станков / Г.Н. Васильев, А.Г. Ягопольский, А.П. Тремасов // СТИН. 2003. №7. С. 14-17.
7. Игнатъев С.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции / С.А. Игнатъев, В.В. Горбунов, А.А. Игнатъев. Саратов: СГТУ, 2009. 160 с.

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 process control», Saratov State Technical University.

Каракозова Анна Владимировна – студентка специальности «Автоматизированная система обработки информации и управления» факультета электронной техники и приборостроения Саратовского государственного технического университета.

Karakozova Anna Vladimirovna – student of the specialty «Automated Information Processing and Management» department of Electronics and Instrumentation, Saratov State Technical University.

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 004.891

Т.Д. Козлова, Е.М.Самойлова

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН НЕИСПРАВНОСТЕЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТАНОЧНЫХ МОДУЛЕЙ

В статье описывается методика разработки экспертной системы поддержки принятия решений для определения причин неисправностей автоматизированных станочных модулей.

Экспертная система, методика разработки, база знаний, автоматизированный станочный модуль

T.D. Kozlova, E.M. Samoilova

METHOD DEVELOPMENT EXPERT SYSTEM TO DETERMINE THE CAUSE AUTOMATED MACHINE MODULE

The article describes how to develop an expert decision support system for determining the causes of failures of automated machine tool modules.

The expert system development methodology, knowledge base, automated machine tools module

В настоящее время разработка и использование экспертных систем (ЭС) является одним из ведущих направлений в области развития искусственного интеллекта в таких сферах, как промышленность, образование, экономика, здравоохранение и т.д. [3, 6, 7].

Рассмотрим использование ЭС для решения задач диагностики и управления в условиях автоматизированного производства, когда ЭС является частью системы мониторинга технологического процесса. В связи с отсутствием единого подхода к созданию таких систем, возникает необходимость разработки методики построения ЭС поддержки принятия решений при определении причин неисправностей технологических систем [1 – 3].

При построении ЭС необходимо следовать следующим правилам:

- обеспечение информационной универсальности;
- обеспечение возможности расширения;
- обеспечение внутренней совместимости компонент.

Информационная универсальность заключается в эффективной организации данных и знаний в виде баз данных (БД) и баз знаний (БЗ). Под БД понимается как БД результатов работы ЭС с пользователем, так и внешняя БД к которой будет обращаться ЭС при диалоге с пользователем. В разрабатываемой ЭС поддержки принятия решений для определения причин неисправностей автоматизированного станочного модуля предлагается использование внешней БД отказов, доступ к которой будет осуществляться для пользователей с высоким уровнем профессионализма. Также предусмотрено использование внутренней БД, с которой работает БЗ [6].

С целью обеспечения *возможности расширения* ЭС, предусмотрено введения новых правил в БЗ.

Разрабатываемая экспертная система поддержки принятия решений предназначена для реализации в составе системы мониторинга технологического процесса (СМТП) [5]. Таким образом, существует необходимость *обеспечения внутренней совместимости компонент*. ЭС осуществляет поддержку принятия управленческих решений наладчиком технологического оборудования при анализе диагностической информации поступающей из системы мониторинга, а также осуществляет помощь при корректирующих мероприятиях (устранение неисправностей, повышение качество технологического процесса).

Для функционирования СМТП создан комплекс программных продуктов, позволяющий в едином информационном пространстве все процессы измерения, обработки, визуализации и передачи результатов контроля пользователями различного уровня квалификации. В БД ЭСПП хранятся основные неисправности АСМ и методы их устранения. Также в БД ЭСПП хранятся результаты основных экспериментальных исследований, проводимых учеными в области [4].

Таким образом, БД ЭС и БД системы мониторинга находится в едином информационном пространстве, что позволяет автоматически обновлять БД отказов АСМ при появлении новой информации. Программное обеспечение СМТП предоставляет инструкции (рис.1).

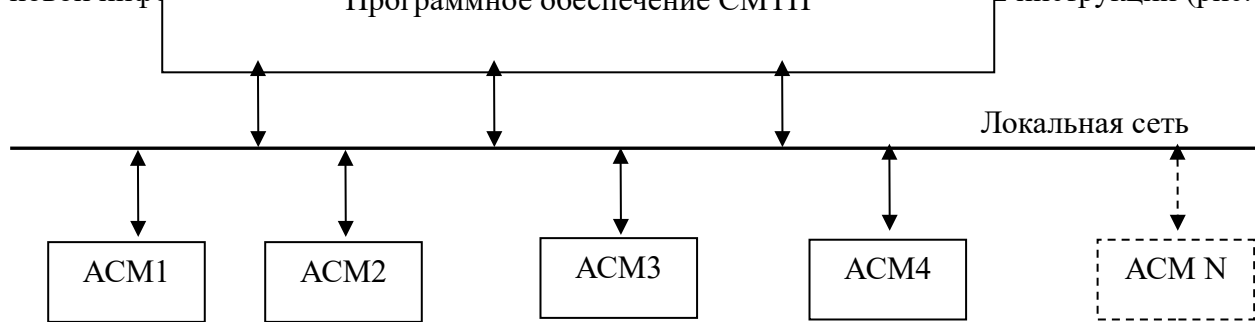


Рис.1. Организация связи системы СМТП с экспертной системой

В основе предлагаемой методики разработки ЭС находится обобщенная задача, связанная с достижением цели G [3]: $\Psi_x \rightarrow y$ где x – исходные данные и знания ($x \in X$), Ψ – оператор, метод, способ, или алгоритм для получения решения y , позволяющего достичь или приблизиться к цели G при выполнении некоторых условий (ограничений и связей). Цель связана с повышением эффективности функционирования технологической системы.

Таким образом, существует необходимость изучения предметной области с целью выявления цели, которую необходимо достигнуть при помощи ЭС, исходные данные и знания, а также методы, алгоритмы, способы получения решения, что и составляет основные этапы разработки экспертной системы поддержки принятия решений (рис.2).



Рис.2. Основные этапы разработки экспертной системы поддержки принятия решений

Цель разработки. При разработке ЭС поддержки принятия решений для технологической системы разработчиками должна преследоваться цель повышения качества изготавливаемой продукции, обеспечение надежности и работоспособности технологической системы.

Исходные данные. Исходными данными будут являться возникшие неисправности – параметрические и функциональные отказы основных модулей АСМ. Для достижения цели будут использоваться алгоритмы методы и способы, решением в данной задаче является определение способа устранения возникших неисправностей. Таким образом, для принятия управленческих решений в БД и БЗ ЭС необходимо хранить и накапливать информацию о следующих основных критериях:

1. входные данные (возникшие неисправности в технологической системе);
2. выходные данные (способы устранения возникших неисправностей);
3. результаты работы ЭС.

Общая характеристика компонентов ЭС. Для повышения эффективности работы ЭС необходимо наличие следующих компонентов: интеллектуальный интерфейс; БД результатов работы ЭС и внешняя БД для обеспечения связи с компонентами верхнего уровня.

Методы и способы устранения неисправностей по возможности должны храниться в БД ЭС, то есть они не должны быть привязаны к логическому выводу. В процессе работы ЭС должна обращаться к внешней БД. Отделение БД от логического вывода позволит обновлять данные о неисправностях и способах их устранения без изменения исходного кода

программы, т.е. без привлечения программиста. Но для решения данной задачи, понадобится привлечение высококвалифицированных программистов, а это является не всегда возможным. БД может являться частью ЭС и разработана в той же среде, а может быть представлена независимым внешним модулем, разработанным при помощи специализированных систем управления базами данных (СУБД).

Для статистической обработки результатов диалога ЭС с пользователем, существует необходимость БД результатов работы ЭС, представленной в виде текстовых файлов. Выполнение данного условия упростит процедуру вывода на печать при необходимости.

При разработке ЭС поддержки принятия решений необходимо учитывать уровень профессионализма пользователей (обычно два: высокий и низкий).

Методы представления данных и знаний. После определения основных критериев и компонентов ЭС, необходимо выбрать способ представления знаний. Выделяют следующие модели представления знаний: продукционная модель, семантические сети, фреймы. Продукционные модели являются пока более популярными, поэтому для построения БЗ ЭС поддержки принятия решений данная модель знаний является наиболее предпочтительной [4].

Правила в БЗ ЭС имеют вид:

ЕСЛИ A ТО S, где A – условие; S- действие.

Действие *S* выполняется, если *A* истинно. Наиболее часто действие *S*, так же, как и условие, представляет собой утверждение, которое может быть выведено системой (то есть становится ей известной), если истинно условие правила *A*. Разрабатываемая БЗ носит статический характер, так как факты, хранимые в базе знаний, не изменяются в процессе решения задачи.

Внешняя база данных отказов ЭС представлена реляционной базой данных, реализованной в СУБД Access 2007 (рис.3) [5].

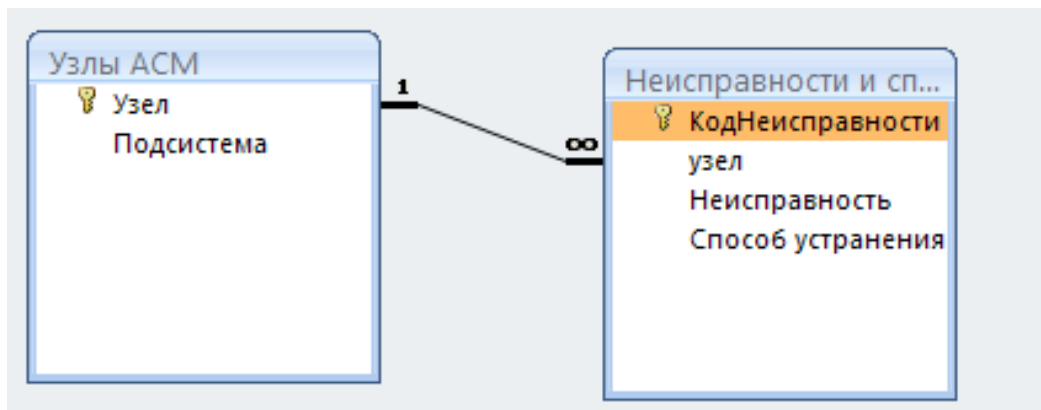


Рис.3. Схема внешней базы данных в СУБД Access 2007

Алгоритмы получения решений. Одним из важнейших этапов разработки ЭС поддержки принятия решений является разработка алгоритмов работы ЭС в различных ситуациях. Алгоритм является основой программной реализации ЭС. На рис.4. представлен алгоритм работы ЭС при определении причин неисправностей основных модулей АСМ.

Программная реализация ЭС поддержки принятия решений. Экспертная система поддержки принятия решений реализована при помощи объектно-ориентированного языка Delphi. При запуске ЭС, пользователю предлагается выбрать, к какому типу пользователей он себя относит.

Для пользователей с большим опытом работы предусмотрены четыре режима работы: «Устранение функциональных отказов», «Устранение параметрических отказов», «Устранение неисправности по коду ошибки», «Работа с базой данных отказов». Для пользователей с

малым опытом работы предусмотрены два режима работы: «Устранение функциональных отказов», «Устранение параметрических отказов».

В ЭС для каждого функционального модуля представлены определенные группы отказов. Например, отказы для модуля «Шпиндель» представлены на рис.5. Пользователь выбирает предполагаемый отказ и получает рекомендацию по способу его устранения. Например, если не включается датчик вращения шпинделя, то проблема в генерации сигнала при переходе из «1» в «0» (рис.6). Если данный ответ ЭС удовлетворяет пользователя, то система предлагает либо завершить работу путем нажатия кнопки «Выход», либо продолжить устранение других неисправностей (рис.7).

Аналогичным образом ЭС работает при возникновении параметрического отказа.

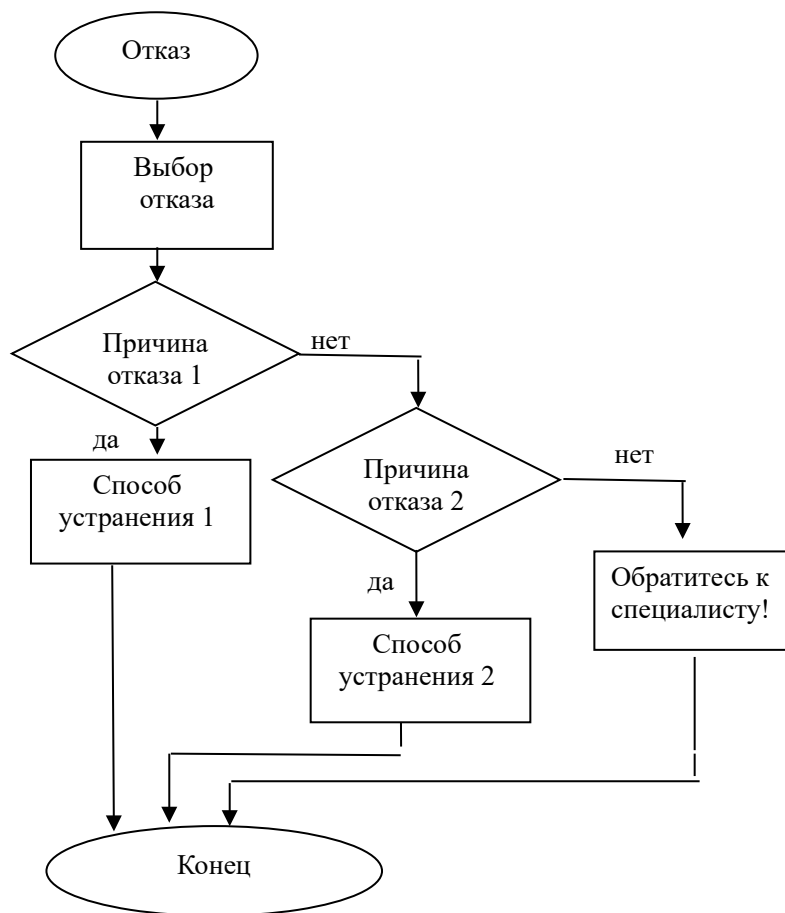


Рис.4. Алгоритм работы ЭС

Form12

Пожалуйста, выберите предполагаемый отказ:

- Не набирает нужных оборотов
- Не включается
- Не включается датчик вращения
- Датчик вращения шпинделя значение "1"
- Датчик вращения шпинделя значение "0"

Рис.5. Окно выбора предполагаемого отказа

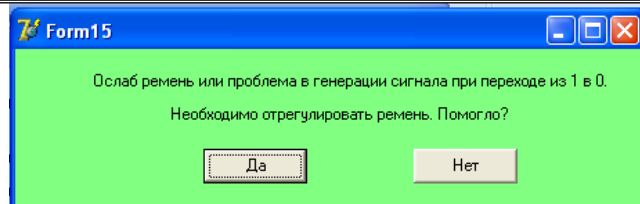


Рис.6. Рекомендация ЭС

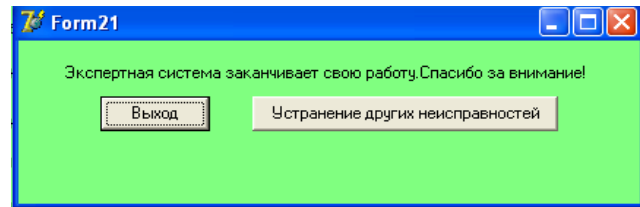


Рис.7. Результат работы ЭС

При работе ЭС в режиме «Устранение неисправности по коду ошибки» пользователю предлагается поиск причины отказа по коду ошибки (рис.8). В режиме «Работа с базой данных отказов» реализован доступ к внешней БД.

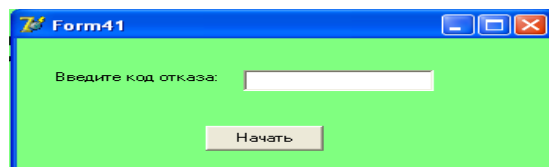


Рис.8. Окно для ввода кода ошибки

Единый подход к разработке ЭС поддержки принятия решений для определения причин неисправностей АСМ, представленный данной методикой, может значительно ускорить процесс разработки сложной системы управления ТП, повысить качество решения задачи и дать экономию ресурсов за счет эффективного распределения функций центрального управления и локальных измерительных и управляющих подсистем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берестнева О.Г. Компьютерная система принятия решений по результатам экспертного оценивания в задачах оценки качества образования / О.Г. Берестнева, О.В. Марухина // Образовательные технологии и общество. Москва. 2003, № 5(3). С. 216-231.
2. Петрухин А.В. Принятие технологических решений в литейном производстве с использованием интегрированной экспертной системы / А.В. Петрухин, В.К. Агеев, Ю.Ф. Воронин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 5. С. 64-65.
3. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами / [А.Н. Антамошин](#), [О.В. Близнова](#), [А.В. Бобов](#), [А.А. Большаков](#). М.: Изд-во: Горячая Линия - Телеком, 2006. 160 с.
4. Козлова Т.Д. Экспертная система для определения причин неисправностей технологических систем // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2011. № 2 (56). С. 219-224.
5. Игнатъев С.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции / С.А. Игнатъев, В.В. Горбунов, А.А. Игнатъев. Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2009. 160 с.
6. Игнатъев А.А. Совершенствование управления качеством продукции на основе системы мониторинга с элементами искусственного интеллекта / А.А. Игнатъев, Е.М. Самойло-

ва // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2009. № 3 (41). С. 207-209.

Козлова Татьяна Дмитриевна – аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Самойлова Елена Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Tatiana Dmitrievna Kozlova – graduate student, «Automation and process control», Saratov State Technical University

Samoilova Elena Mikhailovna – Ph.D., Associate Professor of «Automation and process control» Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 004.891

Т.Д. Козлова, А.А. Игнатьев

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТАНОЧНЫХ МОДУЛЕЙ

Рассматривается экспертная система поддержки принятия решений для определения причин неисправностей автоматизированных станочных модулей, формирующая рекомендации по устранению неисправностей наладчикам технологического оборудования.

Экспертная система, автоматизированный станочный модуль, база знаний, режим работы, отказ, способ устранения

T.D. Kozlova, AA Ignatiev

EXPERT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR AUTOMATED DIAGNOSING MACHINE TOOL MODULES

The expert system of support of decision-making for definition of the reasons of malfunctions automated machine tool the modules, forming recommendations about elimination of malfunctions to servicemen of the process equipment is considered.

The expert system, automated станочный the module, the knowledge base, an operating mode, refusal, a way of elimination

Экспертные системы поддержки принятия решений (ЭСПП) направлены на оказание помощи при принятии решений при оценке качества продукции и выбора режима обработки [1]. В области машиностроения данные системы нашли применение для принятия технологических решений [2, 3]. Данные системы не направлены на устранение неисправностей самого технологического оборудования.

Разрабатываемая ЭСПП позволяет определять не только причину ухудшения качества изготавливаемой продукции, но и причины отказов основных элементов автоматизированного станочного модуля (АСМ).

При обнаружении неисправностей АСМ, ЭС реализует поддержку принятия решений при поиске неисправностей и рекомендует способы их устранения. ЭС является частью системы мониторинга технологического процесса (СМТП), структура которой представлена на рис.1.

В данной системе реализован мониторинг качества технологического процесса: контроль качества состояния оборудования, контроль режима обработки, контроль параметров деталей. Данные системы формируют базу данных текущего состояния АСМ.

Каждой неисправности АСМ соответствует свой код ошибки, формируемый ЭВМ модуля, который является входной информацией для базы данных (БД) отказов. БД представляет собой совокупность связанных данных об отказах АСМ.

При поддержке принятия решений система оперирует знаниями, которые представляют собой базу знаний (БЗ). БЗ – это структурированные данные о предметной области, для которой предназначена ЭС [4]. БЗ экспертной системы содержит не только данные об отказах АСМ и способах их устранения, которые получены в результате длительных экспериментальных исследований в условиях производства [5], а также правила обработки этих данных.

Иерархическая структура АСМ ТПАРМ представляет собой совокупность основных функциональных подсистем, состоящей из блоков, осуществляющих процесс функционирования модуля и связей между ними в соответствии с рис. 2 [6].

В любой из представленных подсистем в процессе функционирования может произойти технологический отказ.

БЗ экспертной системы содержит правила, описывающие состояние формообразующей, управляющей и вспомогательной подсистем АСМ.

Предметная область разрабатываемой ЭС представлена в виде производственной модели. Производственная модель или модель, основанная на правилах, позволяет представить знания в виде предложений типа «Если (условие)», «то (действие)».

В данной ЭС условием выступает неисправность элемента одной из подсистем АСМ, в качестве действия используется способ устранения неисправности [7].

В качестве среды построения ЭСППР выбран язык программирования высокого уровня Delphi7.

ЭС предназначена для пользователей двух типов: наладчики технологического оборудования и операторы АСМ. Для пользователей первого типа предусмотрены четыре режима работы: «Устранение неисправности», «Качество технологического процесса», «Устранение неисправности по коду ошибки», «Работа с базой данных отказов». Для пользователей второго типа предусмотрены два режима работы: «Устранение неисправностей», «Качество технологического процесса».

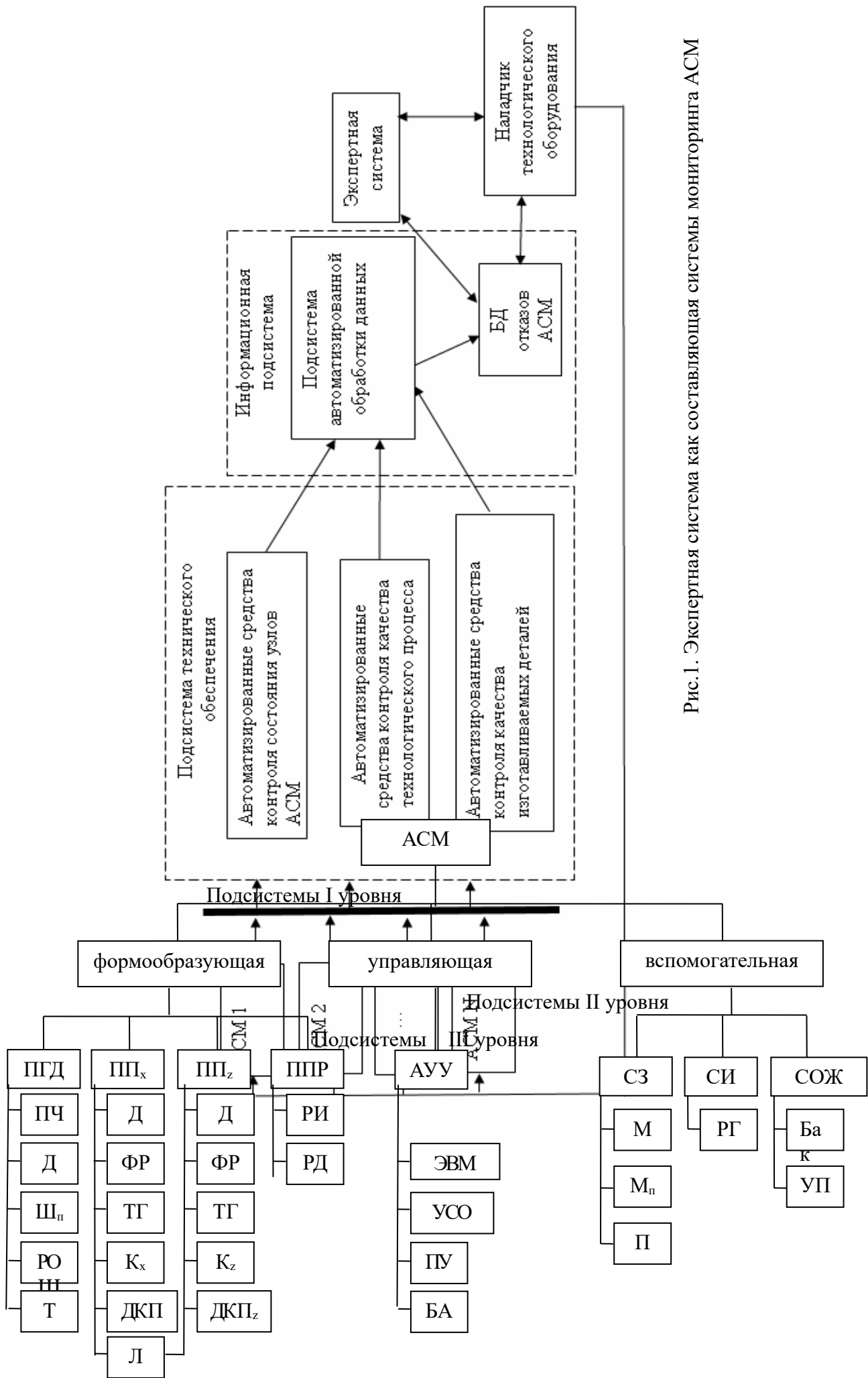


Рис.1. Экспертная система как составляющая системы мониторинга АСМ

Рис. 2. Иерархическая структура АСМ: ПЧ – преобразователь частоты, Д – двигатель, Шп – шпиндель, РОШ – реле оптическое шпинделя, Т – тормоз, ФР – фрикционный редуктор, ТГ – тахогенератор, Кх, Кz – каретки по осям x и z, ДКПх, ДКПz – датчики крайнего положения по осям x и z, ЛИ – лазерный интерферометр, РИ – режущий инструмент, РД – резцедержка, УСО – устройство сопряжения, ПУ – пульт управления, БА – блок автоматики, М – магазин заготовок, Мп – манипулятор, П – патрон, СИ - подсистема смены инструмента, РГ – револьверная головка, СОЖ – подсистема обеспечения смазочно-охлаждающей жидкостью, Бак – бак с СОЖ, УП – устройство подачи СОЖ в зону резания

В режиме «Устранение неисправностей» система выдает рекомендации по способам устранения неисправностей элементов АСМ. Пользователю предлагается выбрать отказавший элемент, в соответствии с окном программы представленном на рис. 3, и предполагаемый отказ, в соответствии с окном программы представленном на рис. 4.

Рис.3. Окно выбора отказавшего модуля

Рис.4. Окно выбора предполагаемого отказа

Например, для отказа шпинделя «Не набирает нужных оборотов», ЭСППР выдает рекомендацию «Необходимо отрегулировать скорость», в соответствии с окном программы представленном на рис. 5.

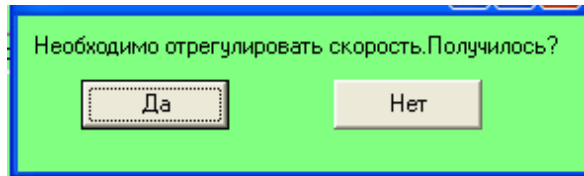


Рис.5. Рекомендация экспертной системы

В режиме «Качество технологического процесса» система определяет причины ухудшения качества изготавливаемых деталей. Например, если размеры детали не выдерживаются при обработке, ЭС выдаст рекомендацию «Необходимо проверить позиционирование суппорта и отрегулировать усилие зажатия заготовки в патроне» в соответствии с окном программы представленном на рис.6.

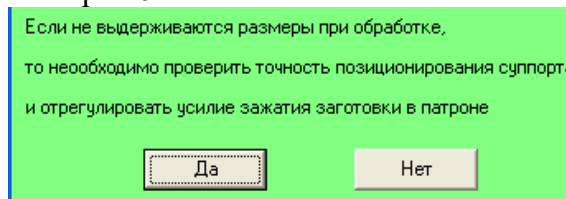


Рис.6. Рекомендация экспертной системы

В режиме «Устранение неисправности по коду ошибки» система определяет причину отказа путем ввода кода ошибки в соответствии с окном программы представленном на рис. 7.

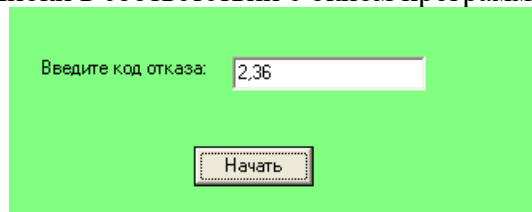


Рис.7. Окно для ввода кода ошибки

В режиме «Работа с базой данных отказов» реализован доступ к внешней базе данных (БД) отказов АСМ типа ТПАРМ. БД разработана в СУБД Access 2007.Схема БД представлена на рис. 8. При необходимости БД может обновляться и дополняться пользователем без привлечения программиста. Данная функция реализована при помощи формы доступа к таблице отказов и способов их устранения. Форма доступа позволяет просматривать имеющиеся данные об отказах и при необходимости добавлять новые. С целью обеспечения безопасности базы данных, записи в форме предусмотрены только для чтения.

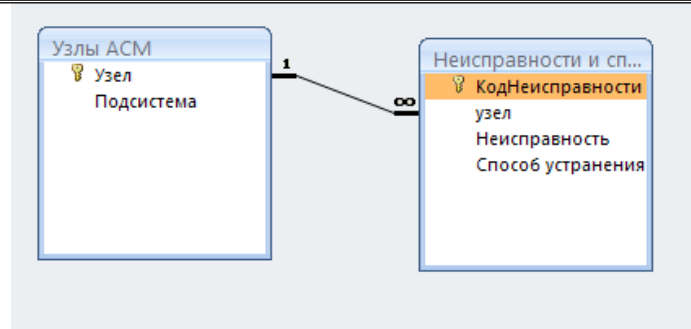


Рис.8. схема базы данных отказов в СУБД Access 2007

В ЭС реализована возможность просмотра диалога пользователя с ЭС. Диалог формируется в виде текстового документа и может быть открыт при помощи любого текстового редактора.

В данной работе рассмотрена экспертная система поддержки принятия решений, которая позволяет выявлять причины неисправностей основных элементов АСМ типа ТПАРМ. Применение данной системы позволяет спрогнозировать ремонтно-профилактические работы, оперативно устранить отказ, повысить коэффициент готовности и качество изготавливаемой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелихов А.Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А.Н. Мелихов, Л.С. Берштейн, С.Я. Коровин. М.: Наука. 1990. 272 с.
2. Юркевич В.В. Экспертная система для токарной обработки / В.В. Юркевич // Вестник машиностроения. 2010. № 6. С. 73-75.
3. Петрухин А.В. Принятие технологических решений в литейном производстве с использованием интегрированной экспертной системы / А.В. Петрухин, В.К. Агеев, Ю.Ф. Воронин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 5. С. 64-65.
4. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. СПб: Питер, 2000. 384 с.
5. Надежность и диагностика технологических систем / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатъев, В.В. Мартынов, А.Г. Схиртладзе. Саратов: СГТУ, 2006. 307 с.
6. Бржозовский Б.М. Обеспечение устойчивого функционирования прецизионных станочных модулей / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатъев, В.В. Мартынов. Саратов: СГТУ, 1990. 120 с.
7. Козлова Т.Д. Экспертная система для определения причин неисправностей технологических систем / Т.Д. Козлова // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2011. №2 (56). С. 219-224.

Козлова Татьяна Дмитриевна – аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Koslova Tatyna Dmitrievna – Postgraduate of department «Automation and management of technological processes» Saratov state technical university

Игнатъев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими

Ignatyev Alexander Anatolevich – doctor of technical sciences, professor, head. Department «Automation and management of technological processes»

УДК 687.586

О.А. Комлева, А.А. Игнатъев

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Рассматриваются вопрос расчета автоматизированной системы автоматического управления с применением электромагнитореологического управляющего элемента для роботизированного технологического комплекса (РТК).

Электромагнитореологический управляющий элемент, передаточная функция, автоматическая система управления, логарифмическая амплитудочастотная характеристика, корректирующее устройство, желаемая логарифмическая амплитудочастотная характеристика

О.А. Komleva, A.A. Ignatyev

SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL WITH ELEKTROMAGNITOREOLOGICH- ESKY'S APPLICATION OF THE MANAGING DIRECTOR OF THE ELEMENT

Are considered a question of calculation of the automated system of automatic control with application of the elektromagnitoreologichesky managing director of an element for a robotizirovanny technological complex (RTK).

Are considered a question on calculation of the automated system of automatic control with application электромагнитореологического an operating element лектромагнитореологический an operating element, transfer function, an automatic control system, logarithmic амплитудочастотная the characteristic, the correcting arrangement, desirable logarithmic амплитудочастотная the characteristic

Существует три основные проблемы тесно связанные с динамикой и механическими колебаниями конструкции РТК: точность позиционирования рабочего органа; качество переходного процесса; точность реализации программной траектории. Причинами возникновения широкополосного спектра вынужденных колебаний деталей и узлов манипулятора является неидеально уравновешенные вращающиеся элементы, технологические несовершенства изготовления и сборки опор, зубчатых передач, шаговых приводов и других функциональных элементов, совершающих периодические движения повышения [1]. Перспективным с точки зрения повышения качества управления является использования электромагнитореологического управляющего элемента (ЭМУЭ) [2,3].

Необходимо произвести выбор функциональных узлов САУ приводами РТК с учетом электромагнитореологического управляющего элемента, для произведения расчета системы рис 1.

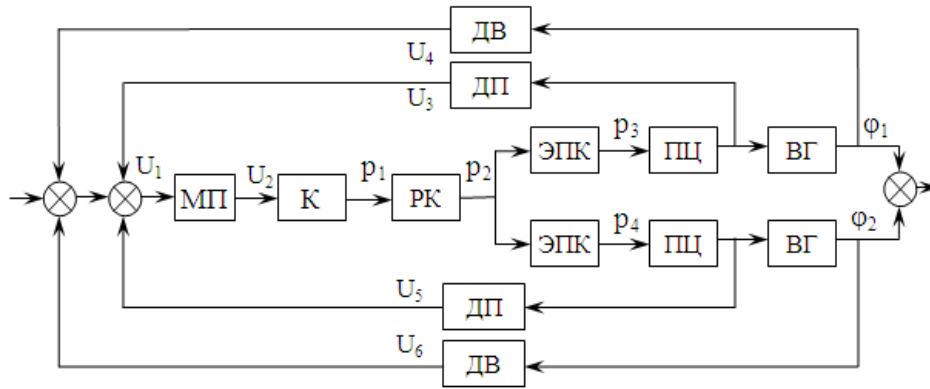


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического управления захватом робота манипулятора
 МП – микропроцессорное устройство; К – компрессор с ресивером; У – усилитель; РК – редукционный клапан; ЭПК – электропневматический клапан (распределитель); ПЦ – пневмоцилиндр; ВГ – виброгаситель; ДП – датчики линейного перемещения; ДВ – датчики вибрации; $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6$ – напряжения управляющих сигналов МП и от датчиков обратной связи; p_1, p_2, p_3, p_4 – давления, создаваемые элементами пневматической линии; l_1, l_2 – линейные перемещения поршня пневмоцилиндра; φ – угол раскрытия губок схвата

Поскольку в системе присутствует дискретный элемент (микропроцессор), необходимо провести z-преобразование передаточной функции системы. $W(z) = \frac{z-1}{z} \cdot z \left\{ \frac{W(p)}{p} \right\}$.

Z-преобразования проведем с помощью программы Matlab, задав время дискретизации, равного времени опроса датчика: $T=0,1$ с [4].

Определим устойчивость импульсной системы. В соответствии с критерием Шур-Кона система будет устойчивой, если определители Δ_k больше 0 для четных k и определители Δ_k меньше 0 для нечетных k. Определители Шур-Кона состояются из коэффициентов характеристического уравнения. Характеристическое уравнение системы имеет вид:

$$L(z) = z^7 - 4.66 \cdot z^6 + 8.971 \cdot z^5 - 9.115 \cdot z^4 + 5.16 \cdot z^3 - 1.555 \cdot z^2 + 0.2047 \cdot z - 0.0042 = 0$$

Построим логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) САУ захватом робота – манипулятора.

Для этого необходимо перейти к псевдочастоте, осуществив обратное билинейные преобразования. Для этого производится замена: $Z = \frac{1 + \omega}{1 - \omega}$

Затем перейдем от ω -изображения к передаточной функции от псевдочастоты, сделав подстановку: $\omega = j \cdot \frac{T_0}{2} \lambda$

где $T_0=0,1$ с – период дискретизации системы.

Используя возможности программы Mathcad, выполним вышеперечисленные преобразования, тогда получим:

$$W(\lambda) = \frac{0.14 \cdot 10^{-6} \cdot j\lambda^7 - 0.86 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^6 + 0.6 \cdot 10^{-3} \cdot j\lambda^5 - 0.022 \cdot \lambda^4 + 0.512 \cdot j\lambda^3 - 15 \cdot \lambda^2 + 120 \cdot j\lambda - 3200}{0.59 \cdot 10^4 \cdot j\lambda^7 + 0.95 \cdot 10^5 \cdot \lambda^6 - 0.69 \cdot 10^6 \cdot j\lambda^5 - 0.51 \cdot 10^7 \cdot \lambda^4 + 0.1 \cdot 10^8 \cdot j\lambda^3 - 0.83 \cdot 10^9 \cdot \lambda^2 + 0.43 \cdot 10^{10} \cdot j\lambda - 0.52 \cdot 10^{11}}$$

Построим ЛАЧХ и ЛФЧХ импульсной системы с помощью программы MATLAB.

```
>> Wa=tf([0.14*10^(-6) -0.86*10^(-5) 0.6*10^(-3) -0.022 0.512 -15 120 -3200],
```

$$[0.59 \cdot 10^7 \ 0.95 \cdot 10^5 \ -0.69 \cdot 10^6 \ -0.51 \cdot 10^7 \ 0.1 \cdot 10^8 \ -0.83 \cdot 10^9 \ 0.43 \cdot 10^{10} \ -0.52 \cdot 10^{11}]$$

Transfer function:

$$1.4e-007 s^7 - 8.6e-006 s^6 + 0.0006 s^5 - 0.022 s^4 + 0.512 s^3 - 15 s^2 + 120 s - 3200$$

$$5.9e006 s^7 + 95000 s^6 - 690000 s^5 - 5.1e006 s^4 + 1e007 s^3 - 8.3e008 s^2 + 4.3e009 s - 5.2e010$$

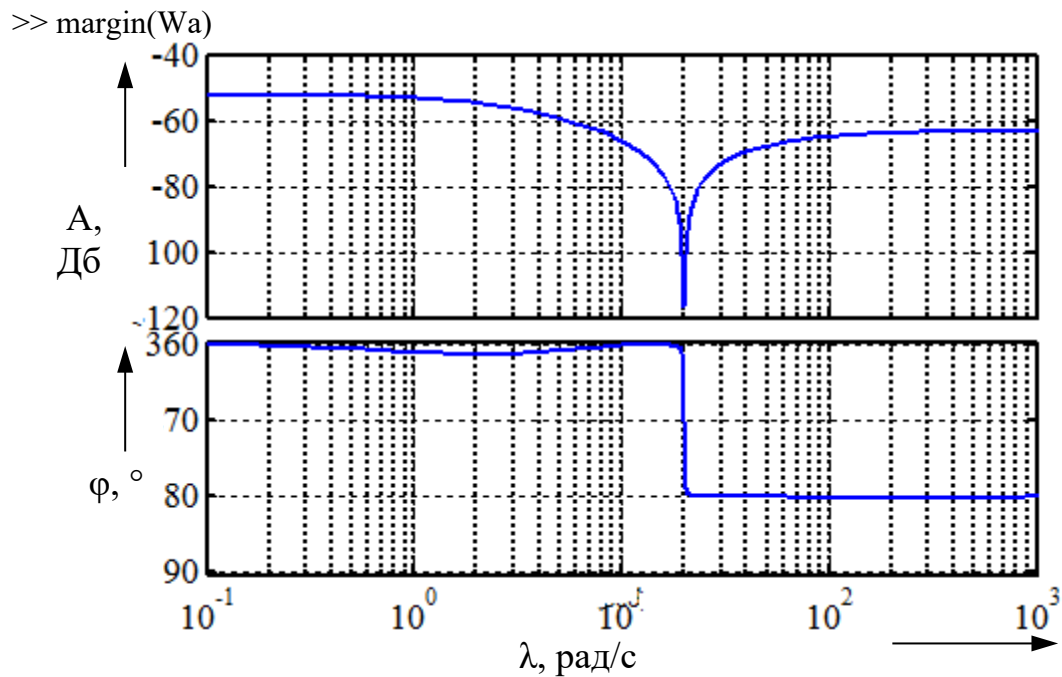


Рис. 2. ЛАЧХ и ЛФЧХ САУ привода РТК

На рис. 2 представлены ЛАЧХ и ЛФЧХ, построенные с помощью команды `margin`. Запас устойчивости по амплитуде – величина в децибелах, на которую надо увеличить коэффициент усиления, чтобы привести систему к границе устойчивости. Запас устойчивости по фазе – это угол, на который надо уменьшить фазо-частотную характеристику, чтобы её значение равнялось -180° . Из графиков видно, что запас устойчивости по амплитуде $\Delta L = 63.2 \text{ дБ}$ и отсутствует запас устойчивости по фазе $\Delta \varphi$

Поскольку в исходной САУ присутствует дискретное устройство, построим желаемую ЛАЧХ (ЖЛАЧХ) методом запретных зон [5]. Для определения запретной зоны построим рабочую точку: $A_p \left(\lambda_{\max}, 20 \lg \left(\frac{(q')^2}{q' \cdot \delta} \right) \right)$.

Частота в рабочей точке $\lambda_{\max} = \frac{g''}{g'} = 0.1$,

где g' – скорость изменения входного сигнала, $g' = 0.05$ МПа/с, g'' – ускорение изменения входного сигнала, $g'' = 0.005$ МПа/с².

Значение амплитуды контрольной точки:

$$A = 20 \lg \left(\frac{(q')^2}{q'' \cdot \delta} \right) = 0.046 \text{ (Дб)}.$$

Следовательно, координаты рабочей точки $A_p(0.1; 0.046)$.

На рис.3. представлена желаемая ЛАЧХ и ЛАЧХ корректирующего устройства.

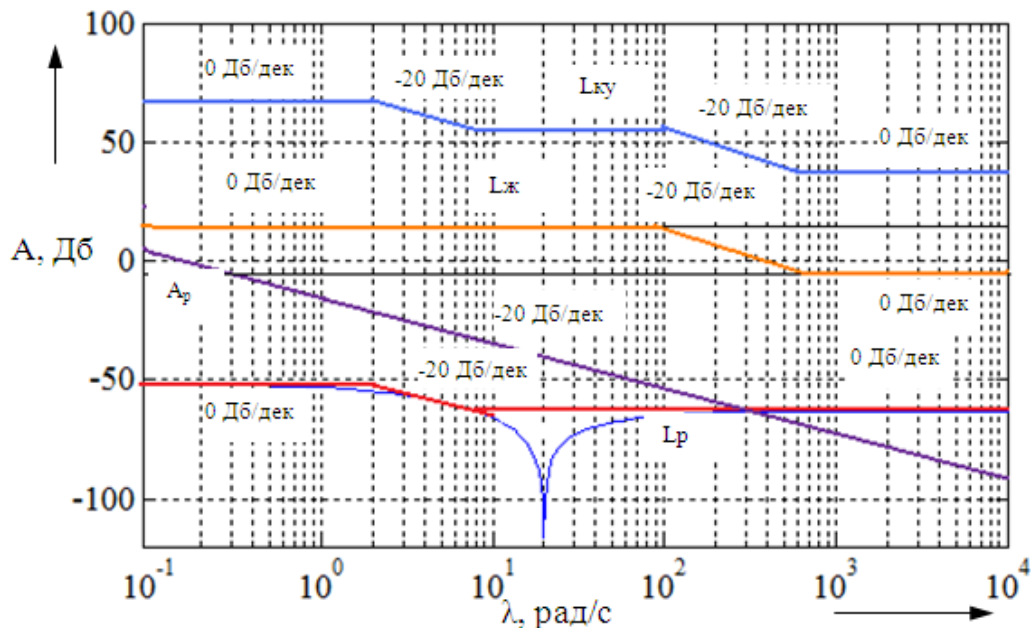


Рис. 3. Определение желаемой ЛАЧХ корректирующего устройства

Применение ЭМУЭ в приводах РТК позволяет увеличить стабильность системы в целом. Получена характеристика последовательного корректирующего устройства, что позволило получить ЛАЧХ САУ привода РТК с применением ЭМУЭ, расположенную выше запретной зоны, что обеспечивает работоспособность системы.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Макаров И.М. Управление робототехническими системами и гибкими автоматизированными производствами / И.М. Макаров. М.: Высш. шк., 1986. 159 с.
- 2.Комлева О.А. Расчет теоретической статической характеристики магнитоэластического амортизатора / О.А. Комлева // Системы автоматического проектирования и автоматизации производства: сб.науч.тр. Саратов: СГТУ, 2009. С. 232-237.
- 3.Комлева О.А. Динамические характеристики электромагнитоэластического управляющего элемента / О.А. Комлева // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. №2(45). С. 116-120.
- 4.Комлева О.А. Автоматизация процесса сборки с применением электромагнитоэластического управляющего устройства / О.А. Комлева // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч.тр. Саратов: СГТУ, 2010. С. 117-120.
5. Комлева О.А. Расчет качества системы автоматического управления захватом робота манипулятора с магнитоэластическим виброгасителем / О.А. Комлева // Информационные технологии, системы автоматизированного проектирования и автоматизация: тр. II Всеросс. науч.техн. конф. Саратов: СГТУ, 2010. С. 103-107.

Комлева Оксана Анатольевна – аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Komleva Oksana Anatolevna – Postgraduate of department «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. 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 615.47

Н.В. Корнилова, М.А. Щербаков

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ОБОЛОЧКИ АППАРАТА «ИСКУССТВЕННОЕ СЕРДЦЕ»

Рассмотрена конструкция электромагнитной генерирующей оболочки. Описан полный цикл работы семисекционного электромагнитного привода. Разработан экспериментальный стенд и представлены результаты исследований.

Генерирующая оболочка, эксперимент, статическая характеристика, динамическая характеристика

N.V. Kornilova, M.A. Shcherbakov

STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMAGNETIC OPERATING COVER OF THE DEVICE «ARTIFICIAL HEART»

The design of an electromagnetic generating cover is considered. The full cycle of work of a seven-section electromagnetic drive is described. The experimental stand is developed and results of researches are presented.

A generating cover, experiment, the static characteristic, the dynamic characteristics

В нашем организме, как в любой сложной системе, иногда происходят сбои. Случается, что жизненно важный орган отказывается правильно функционировать. Когда никакие лекарства и прочие лечебные процедуры помочь не в состоянии, прибегают к различным операциям. В некоторых случаях во время операций, сердце может быть остановлено и для временного выполнения его функций используют аппарат «Искусственное сердце» (АИС).

Системы вспомогательного кровообращения (ВК) помогают насосной функции сердца, снижая нагрузку на левый желудочек (ЛЖ), и обеспечивают достаточный кровоток для гарантированной адекватной перфузии органов и тканей. Временное подключение аппарата ВК позволяет в 25% случаев восстановить сердечную деятельность, и впоследствии отключить его.

С технической точки зрения сердце представляет собой насос и клапаны для осуществления циркуляции крови. Но существует проблема, без решения которой невозможно создание эффективно действующего аппарата, а именно механическое взаимодействие узлов трения АИС с плазмой крови, которые постепенно разрушают последнюю без возможности её восстановления. Перспективным является использование упруго-оболочечных магнитожидкостных элементов для создания низконапорных клапанов и электрогидравлического насоса. При использовании магнитных жидкостей в упругих оболочках для имитации работы сердечных клапанов и насоса возникла задача разработки пространственно распределенного генератора электромагнитных полей. Таким элементом явилась генерирующая оболочка, создающая электромагнитное поле, и обеспечивающая технологические параметры электрогидравлического насоса и клапанов с магнито-жидкостными элементами для аппарата «Искусственное сердце» [1, 2].

При проектировании оболочки в качестве генератора распределенных электромагнитных полей была выбрана многослойная семисекционная цилиндрическая катушка, предназначенная для создания градиентного управляющего электромагнитного поля внутри секций. Крайние две секции (первая и седьмая) предназначены для обеспечения функционирования входного и выходного исполнительного элемента клапанного типа, а секции со второй по шестую обеспечивают управление электрогидравлическим насосом, то есть исполнительным элементом волнового типа. Конструкция генерирующей оболочки представлена на рис. 1.

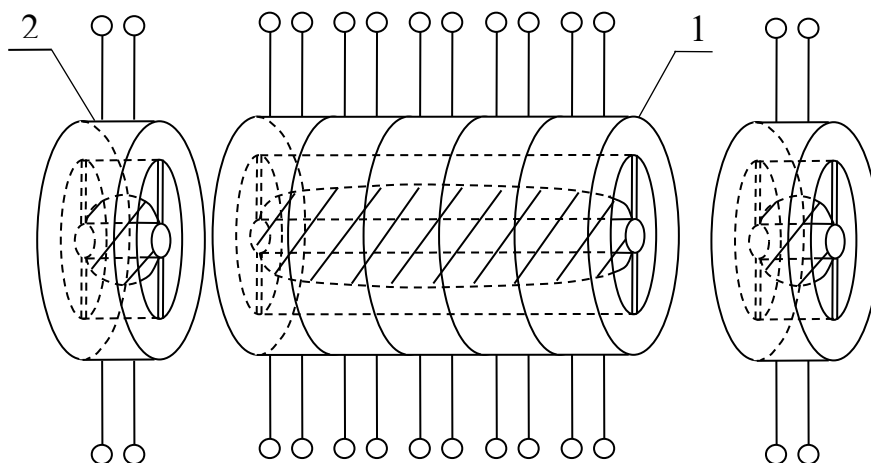


Рис. 1. Базовая конструкция электромагнитной генерирующей оболочки для аппарата «Искусственное сердце»: 1 – исполнительный элемент волнового типа; 2 – исполнительные элементы клапанного типа

Допустимая сила тока при заданной норме плотности тока:

$$I = j \cdot S \quad (1)$$

где j – допустимая плотность тока, A/mm^2 ; S – площадь поперечного сечения проводника, mm^2 .

Для медного проводника диаметром 1 мм допустимая плотность тока $j=13 A/mm^2$.

Площадь поперечного сечения:

$$S=0,785 \cdot d^2=0,785 \text{ мм}^2 \quad (2)$$

Подставим значения j и S в формулу (1)

$$I=13 \cdot 0,785=10,2 \text{ A}$$

Допустимая сила тока $I = 10,2 \text{ A}$.

Для перемещения эквивалента магнитожидкостного элемента внутри исполнитель-

ного механизма достаточно, чтобы каждая секция катушки состояла из двухсот витков [3].

Для расчета индуктивности L многослойной цилиндрической катушки воспользуемся формулой:

$$L = q^2 \cdot L_{cl}, \quad (3)$$

где q – количество слоев катушки; L_{cl} – индуктивность одного слоя катушки, Гн.

Радиус слоя катушки r_{cl} :

$$r_{cl} = r_{2min} + 0,25(q-1)h_1 = 23_{мм} \quad (4)$$

где r_{2min} – радиус цилиндрического каркаса, м; h_1 – шаг между соседними слоями катушки, м

Индуктивность одного слоя катушки определяется:

$$L_{cl} = 38 \cdot r_{cl} \cdot \frac{1}{h_{21}} = 13,9 \text{ мкГн} \quad (5)$$

где l – длина намотки катушки, м; h_2 – шаг намотки.

Тогда, индуктивность многослойной цилиндрической катушки:

$$L = q^2 \cdot L_{cl} = 2,35 \text{ мГн} \quad (6)$$

Полный цикл работы семисекционной электромагнитной оболочки состоит из трех этапов:

1) Начальное положение: входной клапан открыт, выходной закрыт, на обмотках исполнительного элемента напряжение отсутствует, рабочая полость заполнена жидкостью.

2) Сжатие жидкости. В этом режиме положение клапанов не меняется, но на обмотки исполнительного элемента поочередно подается напряжение питания с частотой переключения 10 Гц. Образованная волна захватывает часть жидкости и как поршень передвигается к выходному клапану, создавая избыточное давление жидкости внутри рабочей полости.

3) Выпуск жидкости производится одновременным открытием выходного клапана и закрытием входного. После этого происходит возвращение в начальное положение [4].

Для питания электромагнитной оболочки разработано устройство на основе микроконтроллера, которое согласно заданному алгоритму подает напряжение на требуемую секцию.

Для проведения исследований был собран экспериментальный стенд. Внешний вид стенда представлен на рис. 2.

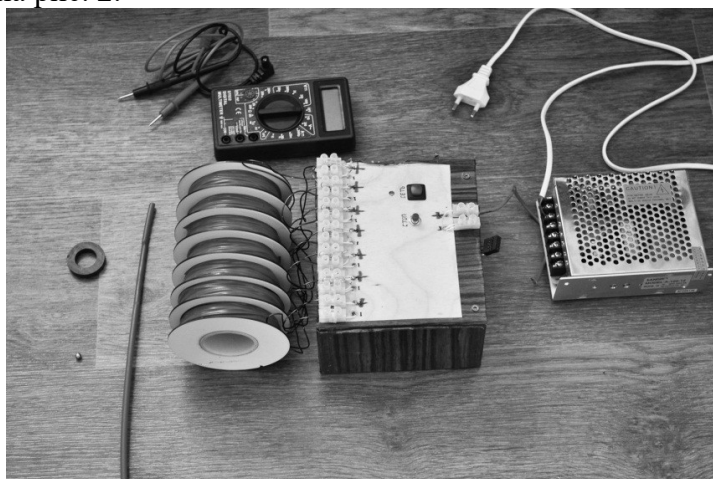


Рис. 2. Внешний вид экспериментального стенда

Экспериментальный стенд включает в себя:

- семисекционный исполнительный элемент;
- эквивалент магнитожидкостного поршня;
- преобразовательный блок;
- блок питания;
- видеочамера;

- ось для эквивалента магнитожидкостного поршня;
- мультиметр.

При определении динамических характеристик исполнительного элемента, менялось время подачи напряжения на секции оболочки, путем программирования микроконтроллера преобразовательного устройства, и замерялось перемещение эквивалента магнитожидкостного поршня. Замер осуществлялся в условиях «сухой камеры» при использовании эквивалента в форме маленького магнитного шара ($d=5\text{мм}$) и кольцевого магнита размером $32\times 18\times 5,5\text{ мм}$.

В результате эксперимента при различном времени поочередной подачи напряжения на все секции оболочки наблюдалось быстрое перемещение магнитного шарика, с частыми подпрыгиваниями и кручением в свободном пространстве и при максимальном времени прохождения эквивалента, равном 1 секунде наблюдалось практически равномерное перемещение магнитного шарика, с редкими колебаниями (рис. 3).

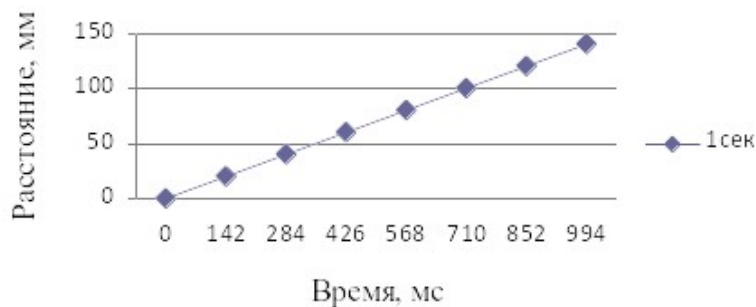


Рис. 3. Динамические характеристики магнитного шара за 1 секунду

Кольцевой эквивалент при подаче допустимого тока на катушку перемещался на постоянное расстояние $L=20\text{ мм}$ в пределах двух соседних секций исполнительного элемента. При любом токе $I > I_{\text{пуск}}$ эквивалент проходил одинаковое расстояние от центра предыдущей секции до центра последующей. При движении от крайней секции катушки эквивалент должен находиться не далее одного сантиметра от ее начала. За пределами одного сантиметра от краев исполнительного элемента начинается мертвая зона, в котором эквивалент не подвержен вытягивающему воздействию магнитного поля. Для обеспечения нормального температурного режима работы стенда, время подачи питания на одну секцию ограничено 30 секундами, что позволяет избежать перегрева. При времени равном 1 секунде кольцевой магнит устойчиво проходил все секции, отсутствовал эффект проскакивания. При меньшем времени прохождения наблюдалось колебание магнита, остановка в середине исполнительного элемента и перемещение с пропуском хода. Таким образом, в результате проведенных экспериментов было определено оптимальное время прохождения эквивалента семи секций, равное 1 секунде.

Экспериментальные исследования проводились как с поршнями в виде эквивалентов магнитожидкостных элементов, так и с поршнем в виде магнитной жидкости марки Т-40 в упругой силиконовой оболочке. Под действием магнитного поля, при изменении постоянной скорости переключения управляющих обмоток определили зависимость перемещения поршня от времени. Эксперименты проводились в условиях «мокрой камеры», что позволило выяснить возможность использования данной конструкции поршня в электрогидравлическом насосе, для вытеснения рабочей жидкости.

Динамические характеристики поршня с магнитной жидкостью в упругой оболочке представлены в таблице 1.

Таблица 1

Динамические характеристики поршня с МЖ в упругой оболочке

Время перемещения, с	Пройденное расстояние, мм
11	140

9	90
6	60
5	50
4	40
3	30
2	20
0	0

По табличным данным построен график, представленный на рис. 4.

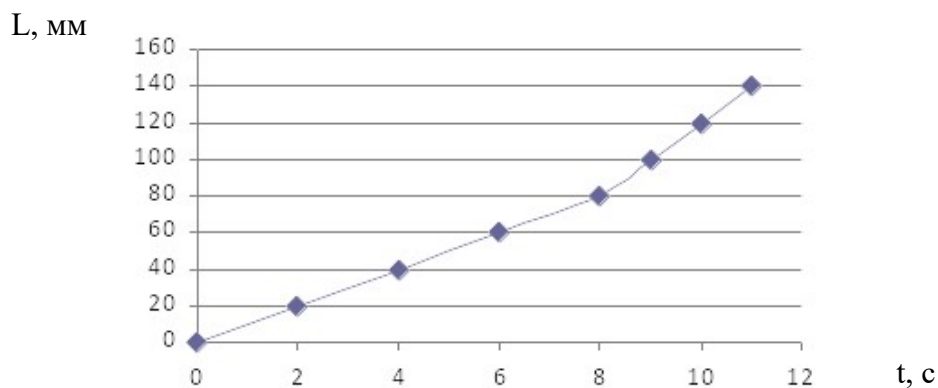


Рис. 4. Динамическая характеристика поршня с магнитной жидкостью в упругой оболочке («мокрая» камера)

Исходя из полученного графика видно, что время прохождения поршнем семи секций оболочки увеличивается до 11 секунд.

Результаты полученной статической характеристики поршня с МЖ в упругой оболочке представлены в таблице 2.

Таблица 2

Статические характеристики поршня с МЖ в упругой оболочке

Пройденное расстояние, мм	Частота переключения обмоток, Гц
5	8
10	6
50	5
70	4
90	3
140	2

По табличным данным построен график статической характеристики, представленный на рис. 5.

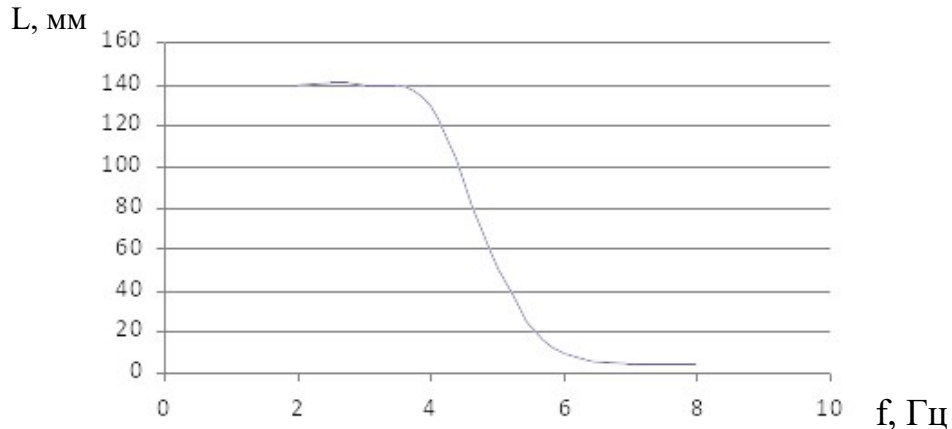


Рис. 5. Статическая характеристика поршня с МЖ в упругой оболочке («мокрая» камера)

В связи с трудностями исследования работы насосного устройства и электромагнитной генерирующей оболочки на животных и пациентах, возникает задача анализа работы аппарата при помощи сравнения результатов проведенных экспериментов с результатами последующего математического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корнилова, Н.В. Постановка задачи разработки пространственно распределенного генератора электромагнитных полей для аппарата «Искусственное сердце» / Н.В. Корнилова, А.В. Власов // Современные технологии в машиностроении: сб. стат. 12 междунар. науч.-практ. конф. Пенза: ПДЗ, 2008. С. 245-247.

2. Корнилова, Н.В. Электромагнитная управляющая оболочка для магнитно-жидкостных элементов аппарата «Искусственное сердце» / Н.В. Корнилова, А.В. Власов // Современные проблемы электрофизики и электродинамики жидкостей: сб. докл. IX междунар. науч. конф. СПб: СОЛО, 2009. С. 330-332.

3. Корнилова, Н.В. Обоснование параметров управляющей электромагнитной оболочки для МЖ сенсоров аппарата «Искусственное сердце» / Н.В. Корнилова, А.В. Власов // Векторная энергетика в технических, биологических и социальных системах: межвуз. сб. науч. тр. Балаково: СООО «АН ВЭ», 2009. С. 44-48.

4. Корнилова, Н.В. Создание модели секции электромагнитного исполнительного элемента / Н.В. Корнилова, М.А. Щербаков // Разработка и внедрение ресурсо- и энергосберегающих технологий и устройств: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. Пенза: ПДЗ, 2010. С. 106-110.

Корнилова Наталья Валерьевна – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пензенского государственного университета, ассистент кафедры «Управление и информатика в технических системах» БИТТУ ФГБОУ ВПО СГТУ

Kornilova Natalia Valerevna – Post-graduate Student of the Department «Automatics and telemechanics» of Penza state university, the assistant of the Department «Management and computer science in technical systems» BITTU of FGBOU VPO SGTU

Щербаков Михаил Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика» Пензенского государственного университета.

Shcherbakov Michael Aleksandrovich – Doctor of technical sciences, professor, head Department «Automatics and telemechanics» of Penza state university.

Власов Андрей Вячеславович – кандидат технических наук, докторант

Vlasov Andrey V. –

кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 62-233.27

Е.В. Курилова, С.А. Игнатъев

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ ВИБРАЦИИ

В статье предложен порядок проведения диагностирования подшипников качения с помощью обработки и анализа сигналов вибрации. Анализируется проявление диагностических признаков дефектов в спектрах виброускорения и виброскорости. Делается вывод о предпосылках создания экспертной системы диагностирования подшипников

Диагностика, вибрация, подшипник, дефект, спектр, вейвлет

E.V. Kurilova, S.A. Ignatyev

DEVELOPMENT OF DIAGNOSTIC ALGORITHM ROLLING BEARINGS FOR VIBRATION PARAMETERS

The authors propose a procedure for diagnosis of rolling bearings with the processing and analysis of vibration signals. Analyzed expression of diagnostic signs of defects in the spectra of acceleration and vibration. The conclusion is a prerequisite for creating an expert system of diagnosis of bearings.

Diagnosis, vibration, bearing, defect, spectrum, wavelet

Подшипники качения, являясь неотъемлемой составляющей большинства роторных механизмов, определяют основные эксплуатационные показатели оборудования, и контроль за их состоянием представляет важную задачу в современной промышленности. Наиболее полную информацию о динамическом состоянии оборудования и в частности о состоянии подшипников позволяют получить методы, основанные на исследовании виброакустических сигналов, анализ которых позволяет выявлять дефекты на самых различных стадиях зарождения [1].

Основными параметрами в вибродиагностике являются виброперемещение, виброскорость и виброускорение. Наиболее простой и наглядной характеристикой колебаний машины является виброперемещение, однако оно не дает непосредственного представления об инерционных силах, действующих на элементы конструкции. Виброскорость позволяет учитывать наличие высокочастотных составляющих в спектре вибрации и, кроме того, является исходным параметром для определения вибрационной мощности. Чаще всего предпочтение отдается сигналу виброускорения по причине того, что процесс преобразования виброперемещения в виброскорость или виброскорости в виброускорение связан с операцией дифференцирования, а обратные преобразования – с интегрированием. Использование дифференцирования приводит к росту шумовой компоненты сигнала. Интегрирование же осуществляется с гораздо большей точностью [2].

Таким образом, система диагностирования состояния подшипника должна иметь следующие входные данные:

- временной сигнал виброускорения;
- геометрические параметры подшипника;
- частота вращения подшипника;
- удаленность измерительного датчика от подшипника.

Зная геометрические параметры подшипника и скорость вращения, можно рассчитать характерные частоты проявления дефектов, к которым относятся:

1) частота обкатывания тел качения по внешней обойме подшипника (BPFO), вычисляемая по формуле:

$$F_H = \frac{N_{mk}}{2} F_1 \left(1 - \frac{D_{mk}}{D_c \cdot \cos j} \right) \quad (1)$$

где N_{tk} – количество тел качения в одном ряду подшипника; F_1 – оборотная частота вращения ротора; D_{tk} – диаметр тела качения; D_c – средний диаметр сепаратора; j – угол контакта тела качения с обоймой [3];

2) частота обкатывания тел качения по внутренней обойме (BPF1):

$$F_B = \frac{N_{mk}}{2} F_1 \left(1 + \frac{D_{mk}}{D_c \cdot \cos j} \right) \quad (2)$$

3) частота работы сепаратора (FTF):

$$F_C = \frac{1}{2} F_1 \left(1 - \frac{D_{mk}}{D_c \cdot \cos j} \right) \quad (3)$$

4) частота работы (вращения) тел качения (BSF):

$$F_{mk} = \frac{1}{2} F_1 \frac{D_{mk}}{D_c} \left(1 - \frac{D_{mk}^2}{D_c^2 \cdot \cos^2 j} \right) \quad (4)$$

Собрав информацию по геометрическим параметрам наиболее распространенных подшипников и рассчитав для них относительные характерные частоты проявления дефектов в долях от оборотной частоты вращения подшипника, можно создать широкую базу данных по подшипникам. Это является обязательной составляющей для автоматизации диагностирования подшипников.

Порядок диагностирования можно разложить на следующие этапы.

1) С помощью датчика (акселерометра) снимается временной сигнал виброускорения и передается в систему диагностирования.

2) Используя методы быстрого преобразования Фурье (БПФ), из первичного сигнала можно получить спектр сигнала виброускорения. На основании данного сигнала анализируется область высоких частот, определяются дефекты износа и общее состояние подшипника.

3) Исходный сигнал интегрируется и обрабатывается процедурой БПФ с целью получить спектр виброскорости. На основании данного сигнала проводится анализ низкочастотной области и выявляются дефекты монтажа.

4) Исходный сигнал обрабатывается с помощью методов вейвлет-анализа, которые позволяют выявлять зарождающиеся дефекты. Отличительной особенностью вейвлет-анализа

является его высокая чувствительность к кратковременным высокочастотным флуктуациям сигнала, так как вейвлет окно обеспечивает адекватную оценку таких флуктуаций за счёт одновременного увеличения амплитуды окна при уменьшении его ширины. Используя вейвлет-преобразование, можно выделить характерные особенности исходного вибросигнала и путем сравнения с эталонными представлениями дефектов провести диагностику состояния подшипника.

5) На основании анализа полученного сигнала, геометрических данных подшипника и удаленности измерительного датчика производится оценка остаточного ресурса подшипника.

В таблице 1 представлены диагностические признаки обнаружения дефектов, которые могут быть заложены при определении правил диагностирования состояния подшипника.

Таблица 1

Диагностические признаки обнаружения дефектов подшипников

Дефект	Диагностические признаки
Место нахождения дефекта	
Дефект на внешней дорожке	Пики в спектре виброускорения на частоте BPF0 и ее гармониках
Дефект на внутренней дорожке	Пики в спектре виброускорения на частоте BPF1 и ее гармониках
Дефект тел качения	Пики в спектре виброускорения на частоте BSF и ее гармониках
Дефект сепаратора	Пики в спектре виброускорения на частоте FTF и ее гармониках
Дефекты монтажа	
Ослабление в соединениях, увеличенные внутренние зазоры	Многочисленные гармоники частоты вращения в спектре вибрации (1я-8я гармоники)
Проскальзывание подшипника на валу	В спектре виброскорости присутствует 3-я гармоника оборотной частоты
Неплотная посадка корпуса подшипника	Наличие нескольких гармоник частоты вращения вала (1-я и 4-я гармоники)
Перекося при посадке	Пик на частоте, равной рабочей частоте вала, умноженной на количество тел качения в подшипнике.
Стадии развития дефекта	
1я – дефекты еще не проявляются	Оценить колебания высокочастотными методами обнаружения дефектов, такими как gSE (Энергия Импульса)
2я – появляются незначительные углубления на дорожках качения	В конце 2-ой стадии развития дефекта, выше и ниже основного амплитудного пика (частота дефекта подшипника) появляются боковые полосы. Высокочастотные колебания могут увеличиться вдвое (по амплитуде) по сравнению с показаниями амплитуд колебаний наблюдаемых на 1-ой стадии развития дефекта подшипника.
3я – износ хорошо заметен	В спектре появляются отдельные подшипниковые частоты (на рисунке Fнк) и их гармоники(2xFнк)., которые сопровождают множество боковых полос. Остаточный срок службы подшипника может составить 1 час от 1 % его ресурса.
4я – подшипник находится в поврежденном состоянии	Амплитуда колебаний на частоте вращения возрастает. Кроме этого возрастают амплитуды колебаний гармонических составляющих кратных частоте вращения (гар-

Представленный порядок проведения диагностирования позволяет проводить оценку состояния подшипника, используя одновременно несколько методов, что существенно повышает достоверность и глубину диагностики. За счет использования дополняющих друг друга методов и диагностических признаков дефектов, можно провести заключение о дальнейшем использовании или замене подшипника. Алгоритм диагностирования в совокупности с собранной базой по подшипникам может быть положен в основу разработки экспертной системы диагностирования подшипников шпиндельных узлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курилова Е.В. Методы вибродиагностики состояния подшипников качения / Е.В. Курилова // Приволжский Дом знаний. 2009. С. 43-46.
2. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. СПб.,: Питер, 2002. 608 с.
3. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика / В.А. Русов. Вып.1. Пермь, 1996. 176 с.

Курилова Екатерина Владимировна – аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Игнатъев Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор, кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Kurilova Ekaterina Vladimirovna – The post-graduate student of chair «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Ignatyev Stas A. – doctor of technical sciences, professor, 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 65.011.56

С.А. Кравченко, А.Ю. Набилкин, В.П. Бирюков

МНОГОСВЯЗНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИЛОЙ РЕЗАНИЯ И ПОЛОЖЕНИЕМ РЕЗЦА ПО ПОПЕРЕЧНОЙ ОСИ

В работе решается задача повышения точности обработки нежестких валов при токарной обработке путем создания многомерной системы стабилизации силы резания и управления положением резца по поперечной оси при связанности данных величин через объект управления. Методом компьютерного моделирования показана эффективность работы системы.

Нежесткий вал, погрешности обработки, сила резания, многомерный стохастический линейно-квадратичный гауссов регулятор, эффективность регулятора, белый шум, цветной шум

S.A. Kravchenko, A.Y. Nabilkin, V.P. Biryukov

MULTICOUPLING CONTROL SYSTEM OF CUTTING FORCE AND CUTTING TOOL TRANSVERSE POSITION

The article solves the problem of non-rigid shafts lathing accuracy increasing with development of multidimensional control system for cutting force and cutting tool transverse position considering relatedness of the variables through the control object. Efficiency of the system operation is shown by computer simulation.

Non-rigid shaft, working error, cutting force, multidimensional stochastic LQG compensator, regulator efficiency, white noise, colored noise

Постановка задачи. Поставлена задача повышения производительности при токарной обработке нежёстких валов методами управления, построена математическая модель объекта управления и возмущающих воздействий, произведён синтез многоканального регулятора, обеспечивающего управление продольным профилем нежёстких валов, регуляторов положения режущей кромки по поперечной оси и силы резания.

Структурная схема системы приведена на рис.1. Между силой резания и поперечным положением инструмента существует взаимосвязь через объект управления, поэтому целесообразным является создание многомерной системы управления силой резания и положением инструмента по поперечной оси и исследование ее эффективности в условиях многосвязности объекта управления. В данной работе произведен синтез линейно-квадратичного стохастического регулятора (ЛКГ-регулятора) двумя данными параметрами (регулятора выхода).

Схема включает структурную схему объекта управления с двумя управляющими воздействиями на входе (u_s , u_y) и двумя регулируемыми выходами (P_z и y), наблюдающего устройства на основе фильтра Калмана и линейный матричный регулятор. Наблюдающее устройство служит для оценки вектора состояния объекта управления и фильтрации ошибок наблюдения выходных переменных. Регулятор на основании оценки вектора состояния \hat{x} определяет управляющие воздействия по продольной подаче u_s и положению резца по поперечной оси u_y .

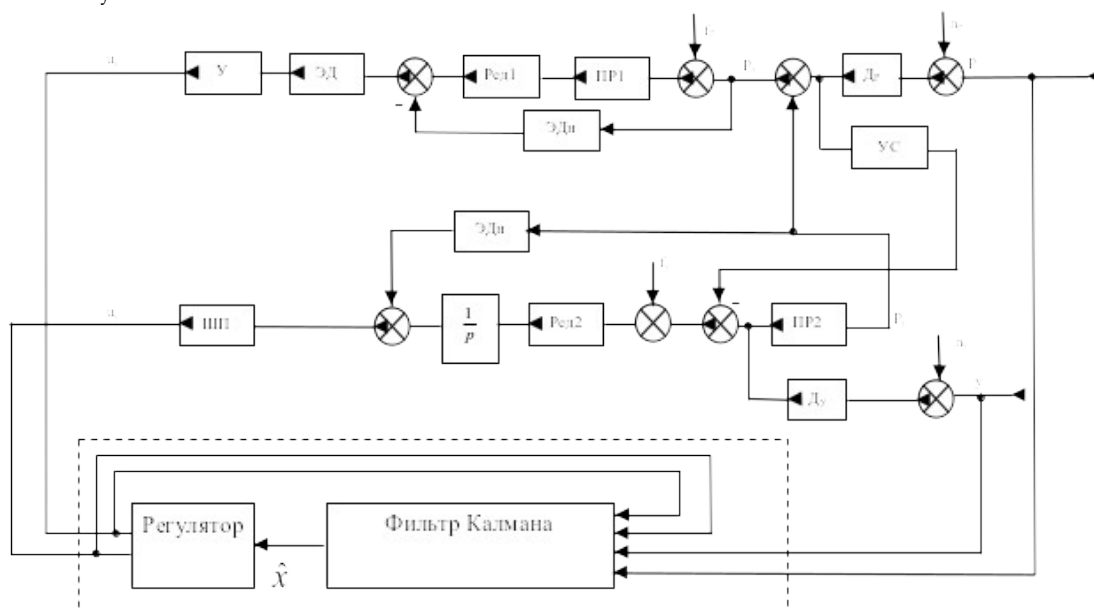


Рис.1. Структурная схема системы управления силой резания и положением резца

по поперечной оси. У – усилитель, ЭДэ – процессы в электрической схеме электродвигателя, ЭДм – механические процессы в электродвигателе, МФП – многоступенчатый фрикционный привод, Ред1 – редуктор, передаточные механизмы привода продольного перемещении суппорта, Ред2 – передаточные механизмы привода поперечного перемещения суппорта
 ПР – процесс резания (ПР1 – влияние подачи на силу резания, ПР2 – влияние глубины резания на силу резания), УС – упругая система станка, Д_р – датчик силы, Д_у – датчик положения реза по оси у

Задача синтеза ЛКГ-регулятора имеет решение при выполнении условий управляемости и наблюдаемости объекта управления. Для решения задачи стабилизации достаточно стабилизируемости и детектируемости объекта управления. Объект является стабилизируемым, если разработанная замкнутая система устойчива. Вопрос устойчивости системы решается в процессе синтеза, так как алгоритм ЛКГ-регулятора находится в области устойчивых решений. Объект является детектируемым, если в синтезируемой системе управления наблюдающее устройство на основе фильтра Калмана является работоспособным [1, 2]. Поэтому в работе производится синтез ЛКГ-регулятора, затем проверяется работоспособность фильтра Калмана.

Алгоритмы синтеза ЛКГ-регулятора разработаны на основе моделей входных сигналов типа белый шум, поэтому для ввода возмущающих воздействий построены модели формирующих фильтров, которые введены в расширенную модель объекта управления, которая приведена на рис.2.

Математическая модель формирующего фильтра возмущения для контура управления положением реза по поперечной оси построена на основе временных рядов задающего воздействия системы управления продольным профилем, полученных при моделировании её работы, математическая модель формирующего фильтра возмущения на силу резания построена на основании экспериментальных временных рядов изменения силы резания, полученных в процессе экспериментальной обработки исследуемых валов.

Синтез ЛКГ-регулятора произведен в пакете Control System Toolbox системы MatLAB [3, 4]. Матрицы весовых коэффициентов, определяющие вклад выходных координат объекта в интегральную ошибку управления и соотношение между ошибкой системы и мощностью управляющих воздействий, подбирались в процессе синтеза регулятора из условия допустимости на технологическом процессе полученных коридоров изменения управляющих воздействий.

Анализ эффективности построенной системы управления произведён путём моделирования работы системы в Simulink (рис. 2) при подаче возмущающих воздействий, соответствующих характеристикам возмущающих воздействий, действующих на технологический процесс.

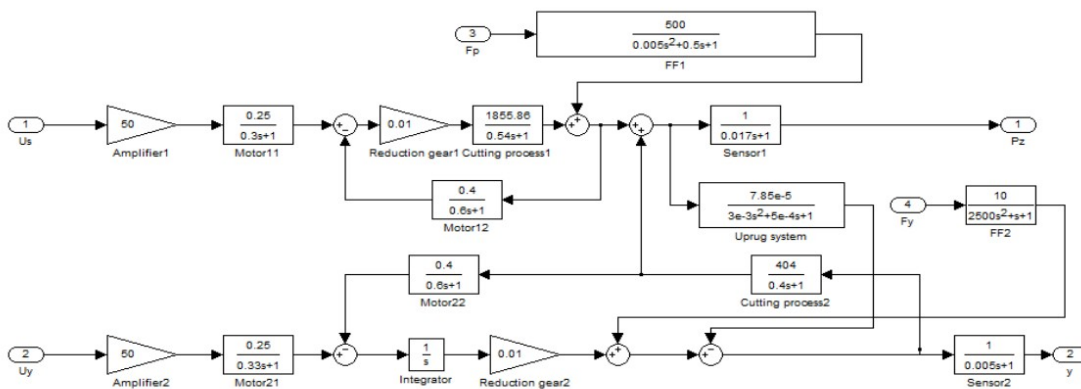


Рис. 2. Расширенная модель многомерного объекта управления в Simulink

На рис. 3 приведены временные ряды силы резания и положения реза по поперечной оси для разомкнутой и замкнутой систем управления.

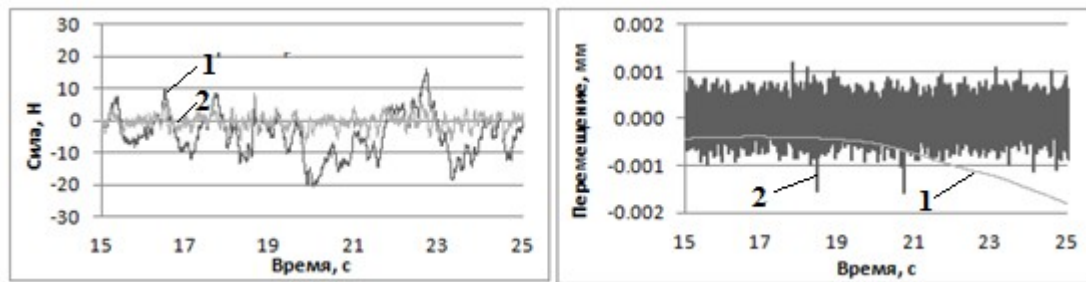


Рис.3. Временные ряды возмущения (1) и выхода системы (2) по силе резания и перемещения инструмента по оси y

Для канала стабилизации силы резания дисперсия системы управления разомкнутой системы равна $s_{раз}^2 = 46,2 H^2$, замкнутой – $s_{зам}^2 = 4,6 H^2$, коэффициент эффективности канала стабилизации силы резания равен $k = 10.1$.

Для канала управления положением резца дисперсия разомкнутой системы равна $s_{раз}^2 = 4,3 \cdot 10^{-3} мм^2$, замкнутой - $s_{зам}^2 = 1 \cdot 10^{-7} мм^2$, коэффициент эффективности канала стабилизации силы резания равен $k = 42.54$.

Коридоры изменения значений управляющих воздействий приведены на рис. 4. Данные диапазоны находятся в допустимых пределах, что говорит о правильном выборе весовых матриц при синтезе ЛКГ-регулятора и обуславливает техническую реализуемость системы управления.

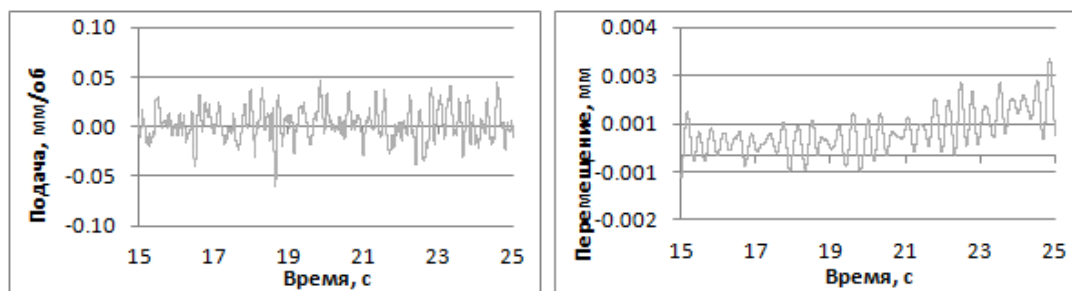


Рис.4. Временные ряды управляющих воздействий (подача, мм/об и положение суппорта по оси y, мм) в процессе функционирования системы управления

Выводы.

1. Произведён синтез многомерной системы управления силой резания и положением резца по поперечной оси.
2. Методом компьютерного моделирования исследована эффективность разработанной системы. При наличии связи регулируемых параметров через объект управления точность стабилизации силы резания снизилась, но остается на достаточном уровне для реализации на технологическом процессе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Квакернак Х. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернак, Р. Сиван. М.: Мир. 1977. 654 с.
2. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / В. Стрейц. М.: Наука, 1985. 294 с.
3. Медведев В.С. Control System Toolbox / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. М.: Диалог МИФИ, 1999. 287 с.

4. Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления: т.3. Синтез регуляторов систем управления / Под ред. К.А. Пупкова, М. Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с.

Кравченко Станислав Алексеевич – аспирант кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета)

Набилкин Артем Юрьевич – аспирант кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета)

Бирюков Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета)

Stanislav A. Kravchenko – Postgraduate of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management (branch of Saratov State Technical University)

Artyom Y. Nabilkin – Postgraduate of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management» (branch of Saratov State Technical University)

Vladimir P. Biryukov – Dr. Sc., professor of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management (branch of Saratov State Technical University)

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 65.011.56

С.А. Кравченко, А.Ю. Набилкин, В.П. Бирюков

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ НЕЖЁСТКИХ ВАЛОВ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

В работе показано, что причиной высокочастотной составляющей погрешности обработки нежесткого вала является переменная составляющая силы резания, которая при дискретности выборки, равной длине заготовки, формирует неконтролируемое случайное возмущение типа белый шум на профиль обрабатываемого изделия. Его устранение обеспечивает система стабилизации силы резания, для которой данное возмущение находится в зоне эффективной работы.

Нежесткий вал, погрешности обработки, сила резания, белый шум, цветной шум, дискретность выборки

S.A. Kravchenko, A.Y. Nabilkin, V.P. Biryukov

SOLVING OF THE PROBLEM OF INCREASING THE EFFICIENCY OF CONTROL SYSTEM OF LONGITUDINAL PROFILE OF NONRIGID SHAFTS IN LATHING

The article shows, that the cause of high-frequency component of non-rigid shaft machining error is a variable component of the cutting force, which forms uncontrollable stochastic disturbance of white noise type on the profile of the processed product because of the sample discreteness, equal to workpiece length. Its elimination is provided with the cutting force control system, having this disturbance in a region of effective operation.

Non-rigid shaft, working error, cutting force, white noise, colored noise, sample discreteness

Постановка задачи. Особенностью токарной обработки нежестких валов является их большая деформация под действием сил резания, что приводит к бочкообразности обработанных изделий и заставляет уходить на режимы с меньшими силами резания, и, соответственно, с меньшими производительностями [1, 2]. В [3] поставлена задача повышения производительности при токарной обработке нежестких валов методами управления, построена математическая модель объекта управления и возмущающих воздействий, произведён синтез многоканального регулятора, обеспечивающего управление продольным профилем нежестких валов путём отслеживания режущей кромкой резца деформации вала в процессе точения. Создание алгоритма управления по пяти базовым точкам вала, имеющим максимальные погрешности обработки, и интерполяция управляющих воздействий позволили создать систему управления профилем нежесткого вала по всей его длине. Анализ эффективности работы построенной системы методом компьютерного моделирования при полученных оценках спектральных плотностей возмущающих воздействий показал, что в зависимости от величины временной задержки системы измерения диаметров обработанных изделий ($z = 4 \div 1$) система позволяет уменьшить влияние возмущающих воздействий по дисперсии в 2,2 – 13,4 раза.

Недостатком данной системы является наличие не обрабатываемой данной системой высокочастотной случайной составляющей неконтролируемого возмущения, приводящей к погрешности формы нежесткого вала. В данной работе производится выявление причины возмущающего воздействия на профиль нежесткого вала и предлагается для устранения (уменьшения) влияния данного возмущения ввести в систему дополнительный контур стабилизации силы резания.

Влияние частоты возмущающего воздействия на эффективность его отработки системой управления с обратной связью. Дисперсия ошибки системы управления определяется выражением:

$$\sigma_{fz}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Phi_f(j\omega)|^2 S_f(\omega) d\omega \quad (1)$$

где $S_f(\omega)$ – спектральная плотность неконтролируемого возмущения; $\Phi_f(j\omega)$ – частотная характеристика замкнутой системы по возмущающему воздействию

$$\Phi_f(j\omega) = \frac{1}{1 + W(j\omega)} \quad (2)$$

$W(j\omega)$ – частотная характеристика разомкнутой системы управления.

Выражения (1), (2) показывают, что эффективность системы управления с обратной

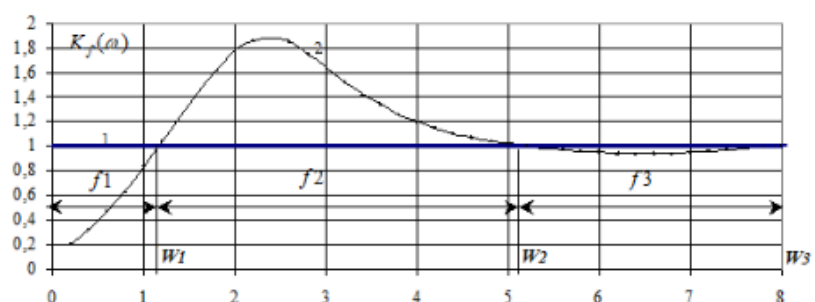


Рис. 1. АЧХ разомкнутой (1) и замкнутой (2) систем управления по возмущающему воздействию

связью зависит от взаимного расположения спектральной плотности возмущающего воздействия и амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы по возмущающему воздействию (АЧХ). Для разомкнутой системы АЧХ по возмущению во всем диапазоне частот равна единице (линия 1 на рис. 1). При замыкании системы АЧХ в области низких частот становится меньше единицы. В [8,9], на основании теоремы об интеграле логарифма АЧХ показано, что если ординаты АЧХ замкнутой системы на низких частотах меньше единицы, то на более высоких частотах они обязательно больше единицы и АЧХ замкнутой системы имеет вид, представленный на рис. 1 (линия 2).

При этом на АЧХ по возмущению можно выделить три участка [6]. На низкочастотном участке $\omega < \omega_1$ коэффициент передачи замкнутой системы по возмущающему воздействию меньше единицы. Дисперсия компонент возмущающего воздействия с такими частотами при наличии управления уменьшается. Это зона эффективного действия обратной связи. При этом эффективность управления максимальна на самых низких частотах и снижается по мере увеличения частоты возмущающего воздействия.

На среднечастотном участке $\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$ коэффициент больше единицы и система увеличивает дисперсию компонент неконтролируемого возмущения с такими частотами. Высокочастотный участок $\omega > \omega_2$ соответствует безразличному действию системы управления, т.е. система управления на такие возмущения не оказывает никакого воздействия.

Тогда удобно для анализа эффективности системы управления разложить неконтролируемые возмущения по спектру на три составляющие - низкочастотную f_1 , среднечастотную f_2 и высокочастотную f_3 находящиеся в соответствующих частотных зонах АЧХ системы по возмущению (рис. 1.)

Результаты проведённого моделирования работы системы управления согласуются с данным положением. Система уменьшает влияние низкочастотных и увеличивает влияние среднечастотных составляющих возмущающих воздействий.

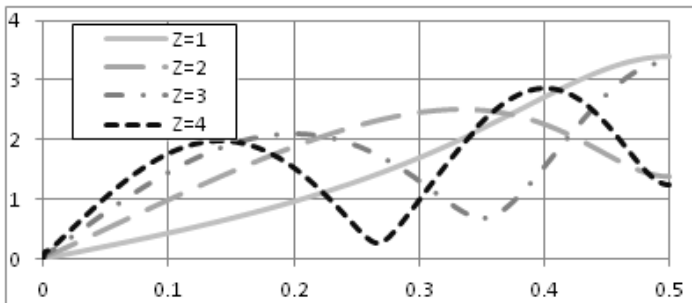


Рис. 2. АЧХ по возмущению при разных

значения с $f = 0,05 \text{ кол} / \Delta T (z = 4)$ до $f = 0,22 \text{ кол} / \Delta T (z = 1)$ и снижается линия АЧХ в области эффективной работы. Это факт и обуславливает повышение эффективности работы системы управления при уменьшении транспортного запаздывания.

Анализ механизмов влияния интенсивности среднечастотных возмущающих воздействий на эффективность системы управления. Анализ механизмов влияния интенсивности среднечастотного возмущающего воздействия произведён путём сравнительного анализа АЧХ по возмущению оптимальных систем управления для возмущающих воздействий с различной интенсивностью в области средних частот. Результаты расчёта представлены на рис. 3. Здесь линиями 1, 2 обозначены спектральная плотность исходного возмущающего воздействия и АЧХ по возмущению оптимального регулятора, построенного с учетом характеристик данного возмущения. Область эффективной работы регулятора, в которой

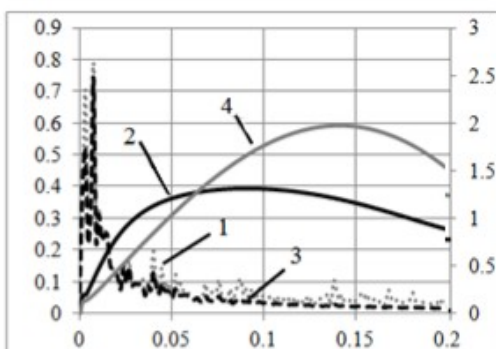


Рис. 3. АЧХ системы управления при разном уровне шума в

В качестве примера применения данного подхода на рис. 2 приведены АЧХ разработанной системы управления по каналу: возмущающее воздействие – выходная регулируемая переменная для различных транспортных запаздываний в объекте управления. Графики показывают, что с уменьшением транспортного запаздывания расширяется частотный диапазон эффективной работы системы управления

модуль частотной характеристики по возмущению меньше единицы и система уменьшает влияние возмущений, равна $0 \leq f_{\phi 1} \leq 0,03$. Линиями 3,4 обозначены спектральная плотность возмущающего воздействия с уменьшенной интенсивностью в области средних частот и АЧХ по возмущению оптимального регулятора, построенного с учётом изменения спектральной плотности. Область эффективной работы регулятора расширилась до $0 \leq f_{\phi 2} \leq 0,05$. Дополнительно опустилась вниз кривая АЧХ в области эффективной работы системы. Следовательно, уменьшение интенсивности возмущения в среднечастотной области позволяет повысить эффективность, как вследствие снижения интенсивности возмущения, так и вследствие расширения по частоте эффективной зоны системы и снижения коэффициента передачи по возмущению в области низкочастотных возмущений (т.к. стало возможным повышение АЧХ в области средних частот).

Таким образом, одним из путей повышения точности обработки нежестких валов является уменьшение интенсивности среднечастотного возмущающего воздействия.

Обоснование влияния переменной составляющей силы резания на точность обработки нежестких валов. Влияние нестабильности силы резания на погрешность обработки выражается в колебаниях элементов узлов станка, приводящих к относительным колебаниям обрабатываемой поверхности заготовки и режущей кромки резца.

Для исследуемого процесса эта зависимость определялась экспериментально. В процессе обработки нежесткого вала длиной 325 мм и диаметром 30 мм. при неизменных режимах резания имели место колебания силы резания в пределах ± 30 Н (рис.4 а), ± 20 Н (рис.4 б), что соответствует диапазону изменения от 40 до 60 Н. При этом имели место случайные колебания диаметра обработанных изделий от 0,01 до 0,06 мм, что соответствует перемещению режущей кромки инструмента относительно заготовки 0,005 до 0,03 мм. Для этих данных оценка коэффициента передачи по каналу сила резания - деформация режущей кромки равна:

$$k_{pe} = \frac{e}{P} = \frac{0,005}{40} \div \frac{0,03}{60} = 0,000125 \div 0,0005 \frac{мм}{Н}, \quad (3)$$

что соответствует экспериментальной амплитудной частотной характеристике для данного процесса резания, представленной на рис. 5.

Данное положение также подтверждается результатами регрессионного анализа зависимости изменения профиля обработанного изделия от силы резания. Для этого в процессе обработки вала производилась запись тангенциальной силы резания. Затем с помощью профилографа снимался продольный профиль получившейся обработанной поверхности. Временные ряды силы резания и профиля поверхности приводились к одному временному масштабу (рис. 6).

График зависимости диаметра обработанной поверхности от силы резания и уравнение регрессии приведены на рис. 7 [7]. Оценка коэффициента регрессии соответствует полученному выше, оценка коэффициента детерминации равна 0,41.

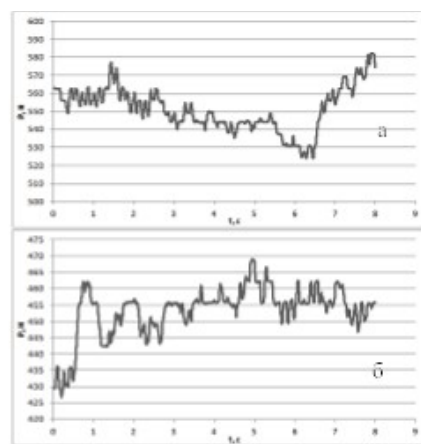


Рис. 4. Графики силы резания

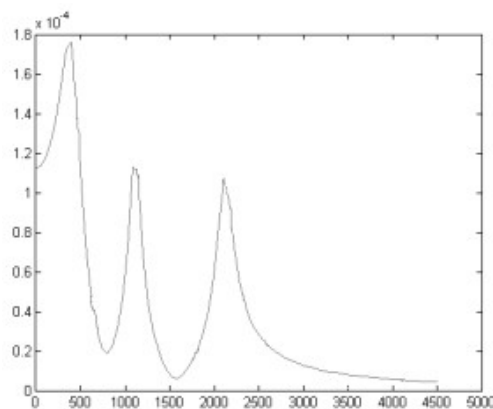


Рис. 5. АЧХ упругой системы

Таким образом, экспериментальные данные подтверждают, что колебания силы резания могут быть причиной возникновения среднечастотных и высокочастотных погрешностей обработки исследуемых изделий.



Рис. 6. Графики силы резания в процессе точения и полученного продольного профиля поверхности образца

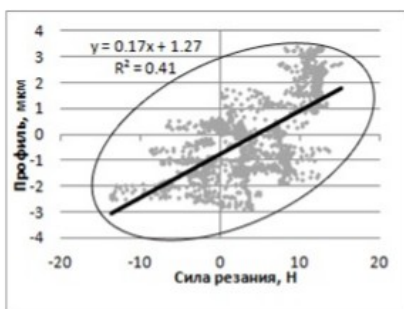


Рис. 7. Графики связи колебания диаметра обработанной детали и силы

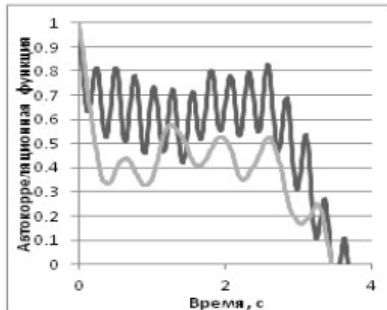


Рис. 8. Графики оценок автокорреляционной функции для силы резания

Анализ взаимосвязи силы резания в процессе обработки и диаметра обработанных изделий в используемых для управления точках по длине вала произведён методом корреляционного анализа. На рис. 8 представлены две оценки автокорреляционных функций двух экспериментальных временных рядов силы резания, приведённых на рис. 4.

Как видно из рис. 8, время затухания автокорреляционной функции силы резания равно 3,5 с. За это время при точении анализируемого нежёсткого вала длиной 325 мм на скорости 500 об/мин с подачей 0,2 мм/об будет обработано 5,83 мм. Таким образом, составляющие погрешности обработки, определяемые изменением силы резания, будут коррелированы только при выборке по длине заготовки с шагом менее 5,83 мм. Следовательно, при длине заготовки 325 мм (что эквивалентно периодичности выборки 325 мм) погрешность, обусловленная изменением силы резания в точках вала, используемых для управления, будет случайным процессом типа «белый шум».

Следовательно, влияние нестабильности силы резания не может быть отработано системой управления продольным

профилем нежёстких валов. Но при данном времени корреляции спектр возмущения по силе резания может оказаться в зоне эффективной работы системы стабилизации силы резания. Поэтому следующим этапом работы является разработка контура обратной связи для стабилизации силы резания в процессе точения, которая может уменьшить «белый шум» в погрешности обработки нежёстких валов.

Многосвязная система управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке. На рис. 9 приведена функциональная схема системы управления продольным профилем нежесткого вала, в которую дополнительно введен контур обратной связи стабилизации силы резания.

Тангенциальная составляющая силы резания измеряется тензодатчиком D_p , сигнал с которого поступает на контроллер. При отклонении силы от заданного значения, контроллер, изменяя сигнал управления, подаваемый через усилитель на двигатель привода суппорта, уменьшает или увеличивает подачу, возвращая силу резания к заданному значению.

Возмущающими воздействиями в данной системе являются изменение припуска обрабатываемой детали, наличие следа предыдущей обработки, нестабильность характеристик материала, износ инструмента, изменение характеристик упругой системы станка. Всё это приводит к изменению тангенциальной силы резания и смещению относительно друг друга рабочей кромки резца и обрабатываемой поверхности детали и появлению возмущения на профиль обрабатываемой детали типа белый шум. Структурная схема системы приведена на рис.10.

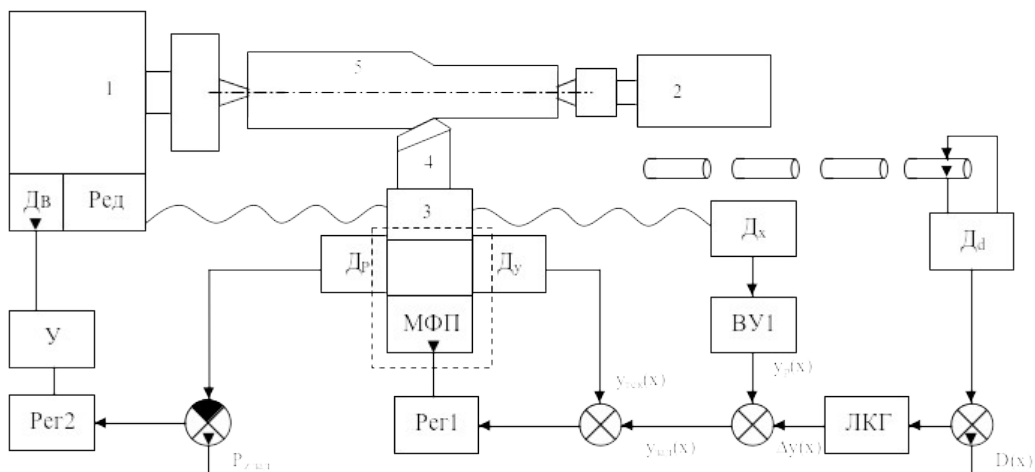


Рис. 9. Функциональная схема системы управления продольным профилем вала при токарной обработке с дополнительным контуром стабилизации силы резания
 1 – шпиндельная бабка, 2 – задняя бабка, 3 – привод продольной подачи суппорта, 4 – суппорт с резцом, 5 – обрабатываемую деталь. МФП – многоступенчатый фрикционный привод, ВУ1 – вычислительное устройство, ЛКГ – ЛКГ-регулятор, Рег1 – алгоритм управления положением по оси y , Рег2 – алгоритм управления силой резания D_d – система измерения диаметра валов, D_x – датчик положение режущей кромки по оси x , D_y – датчик положения режущей кромки по оси y .

Идентификация моделей усилителя, асинхронного электропривода, редуктора станка и датчика силы проводилась на основе паспортных данных. Идентификация модели процесса резания производилась на основании результатов активных экспериментов по врезанию резца в заготовку, точению заготовки с переменной глубиной резания, исследованию амплитудной частотной характеристики замкнутой механической системы станка импульсным методом с использованием моментного молотка и акселерометров.

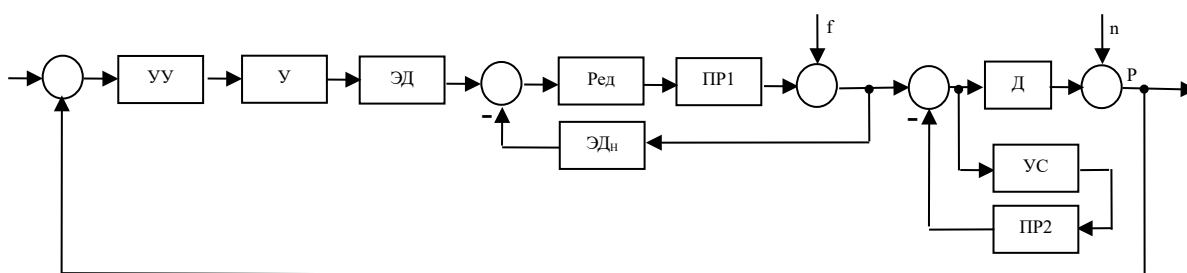


Рис.10. Структурная схема системы стабилизации силы резания
 УУ – устройство управления, У – усилитель, ЭД – электродвигатель, Ред – редуктор, передаточные механизмы привода продольной подачи, ПР – процесс резания (ПР1 – влияние подачи на силу резания, ПР2 – влияние глубины резания на силу резания), УС – упругая система станка, Д – датчик силы

Построение регулятора силы резания и анализ его эффективности производился в системе MatLab. На рис.11 приведена модель объекта, используемая в системе управления силой резания с линейно-квадратичным гауссовым стохастическим регулятором, построенная в Simulink.

На рис. 12 приведены результаты моделирования работы системы управления при подаче возмущающих воздействий, соответствующих характеристикам возмущающих воздействий, действующих на технологический процесс. На рис. 12а показаны временные ряды силы резания с использованием регулятора и без. На рис.12б показан график изменения управляющего воздействия в отклонениях, который подтверждает реализуемость алгоритма управления.

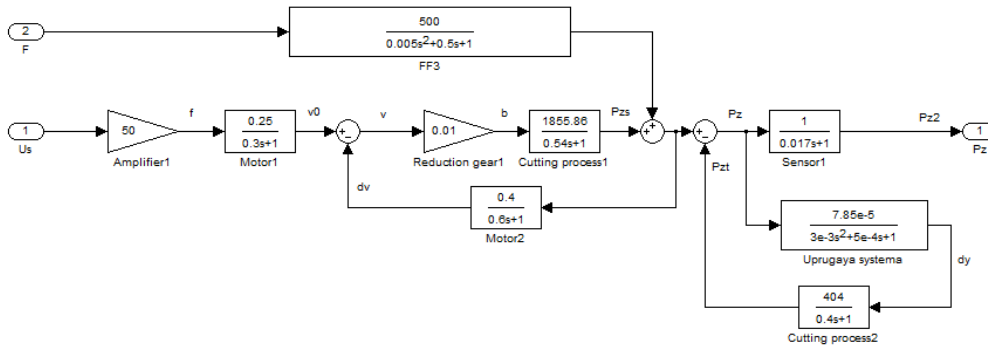


Рис. 11. Модель объекта управления в Simulink

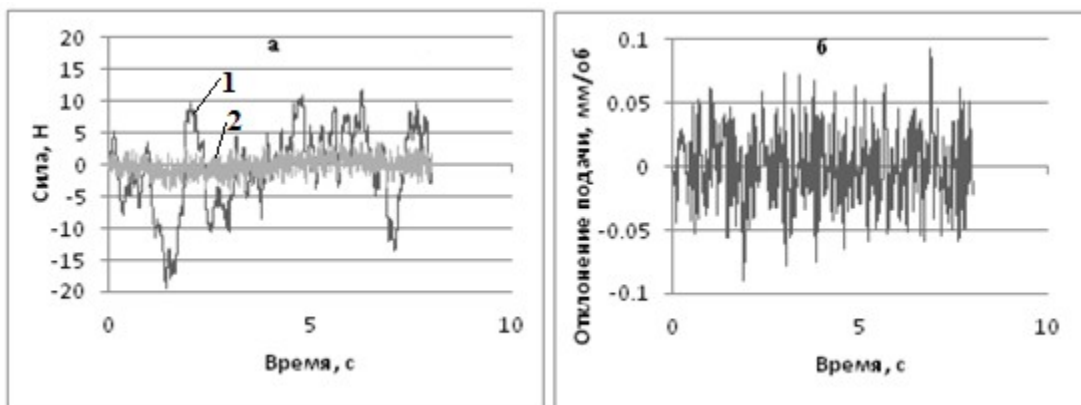


Рис.12. а) Временные ряды силы резания: 1 – для разомкнутой системы 2 – для замкнутой системы. б) Временной ряд изменения управляющего воздействия – продольной подачи в процессе работы системы (в отклонениях от номинального значения)

Дисперсия силы резания разомкнутой системы управления равна $s_{раз}^2 = 37,7 H^2$, дисперсия для замкнутой системы управления $s_{зам}^2 = 1,32 H^2$ Коэффициент эффективности системы равен $k = 28,55$. Таким образом, построенная система позволяет обеспечить стабильность силы резания и снимает часть возмущающих воздействий на точность обработки в среднечастотной области системы управления продольным профилем нежесткого вала.

Выводы.

1. Рассмотрена задача повышения точности отработки системой управления продольным профилем нежестких валов случайной составляющей возмущающих воздействий.
2. Цель достигается путём ввода дополнительного контура стабилизации силы резания, для которого данное возмущающее воздействие находится в зоне эффективной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маталин А.А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. Л.: Машиностроение, 1985, 496 с.
2. Перельгина Т.И. Технологическое обеспечение точности токарной обработки нежестких валов с применением Mathcad / Т.И. Перельгина // Информационные технологии,

системы автоматизированного проектирования и автоматизация: сб.тр. всеросс. науч. конф. Саратов: СГТУ, 2010. С.85-89

3. Бирюков В.П. Расширенная задача управления технологическим процессом / В.П. Бирюков // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2005. № 3(8). С. 116-126.

4. Волгин В.В. Некоторые свойства амплитудно-частотных характеристик линейных систем автоматического регулирования и качество регулирования при случайных воздействиях / В.В. Волгин, Р.Н. Каримов // Известия вузов. Электромеханика. 1973. №2. С. 195-205.

5. Волгин В.В. Учёт реальных возмущающих воздействий и выбор критерия качества регулирования тепловых процессов / В.В. Волгин, Р.Н. Каримов, А.С. Карецкий // Теплотехника. 1970. №3. С. 25-30.

6. Мордкович Б.И. Системы питания технологических линий химических производств / Б.И. Мордкович. М.: Химия, 1975. 174 с.

7. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. / Н. Дрейпер, Г. Смит. М.: Диалектика, 2007. 912 с.

Кравченко Станислав Алексеевич – аспирант кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Stanislav A. Kravchenko – Postgraduate of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management of Saratov State Technical University

Набилкин Артем Юрьевич – аспирант кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Artyom Y. Nabilkin – Postgraduate of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management» of Saratov State Technical University

Бирюков Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Vladimir P. Biryukov – Dr. Sc., professor of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 519.23

В.В. Мартынов, П.В. Мартынов

**ОСНОВЫ СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ
ФОРМИРОВАНИЯ ДАННЫХ О СОСТОЯНИИ
СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Рассмотрены физическая и математическая основы синергетической концепции формирования данных о состоянии сложных технологических объектов.

Сложный технологический объект, состояние, флуктуации, информация, энтропия, эволюция, устойчивость

V.V. Martynov, P.V. Martynov

THE FOUNDATIONS OF THE SYNERGETIC CONCEPT OF THE FORMATION OF DATA ON THE STATE OF COMPLEX TECHNOLOGICAL OBJECTS

Considered the physical and mathematical foundations of the synergetic concept of the formation of data on the state of complex technological objects

Complex technological object, status, fluctuations, information, entropy, evolution, stability

Все существующие и эволюционирующие в реальных условиях объекты по характеру информационного взаимодействия с окружающей средой можно разделить на два типа: изолированные, которые не обмениваются информацией с окружающей средой, и открытые, в которых информационный обмен с окружающей средой имеет место. При этом под информацией будем понимать производимый объектом в процессе эволюции и полностью характеризующий его состояние массив данных в виде выборки или ряда.

С понятием информации тесно связано понятие энтропии – меры неопределенности случайного состояния объекта, возникающего в процессе его эволюции и характеризующегося средним количеством информации, приходящейся на один элемент массива данных. Мерой упорядоченности этого же состояния объекта является отрицательная энтропия, называемая также негэнтропией. Воспринимая информацию из окружающей среды (т.е. входную информацию), объект в процессе эволюции использует ее для перестройки своей внутренней структуры. Результатом этой перестройки становится изменение состояния, негэнтропия которого и преобразуется объектом в выходную информацию в виде данных о состоянии.

Физическая основа концепции: эволюция. Если объект является изолированным, то его состояние необратимо эволюционирует к инвариантному во времени t состоянию, в котором в объекте не наблюдается никаких изменений. Такое состояние является состоянием равновесия. Эволюция произвольного (неравновесного) состояния к состоянию равновесия происходит в результате необратимых процессов, которые в состоянии равновесия прекращаются. Говоря иначе, неравновесное состояние можно определить как состояние, в котором необратимые процессы вынуждают объект эволюционировать к состоянию равновесия (рис.1, а). Энтропия объекта (H) при этом возрастает и в состоянии равновесия достигает максимума. Следовательно, все изолированные объекты эволюционируют таким образом, чтобы минимизировать изменение энтропии и не обмениваться информацией с окружающей средой.

В отличие от изолированных, открытые (сложные технологические) объекты, могут эволюционировать непредсказуемо. Фундаментальное свойство этих объектов проявляется в способности переходить в упорядоченное состояние в результате флуктуаций (рис.1, б).

Во всех динамически стабильных объектах и адаптивных системах эти флуктуации обычно подавляются за счет отрицательных обратных связей, обеспечивающих сохранение структуры и близкого к равновесию состояния. Функционирование таких объектов основывается на получении сигналов от устройств обратной связи относительно положения объектов в пространстве состояний и последующей корректировке этого положения к исходному состоянию с помощью исполнительных механизмов. Если же обратные связи по каким-либо причинам не реализованы или на-

рушены, то благодаря притоку внешней энергии, возникающие вследствие флуктуаций неравновесности не устраняются, а наоборот, возрастают, накапливаются и усиливаются вследствие общей положительной реактивности объектов (рис.2) [1], запуская необратимые диссипативные процессы, которые, размывая неоднородности, приводят к производству объектом энтропии.

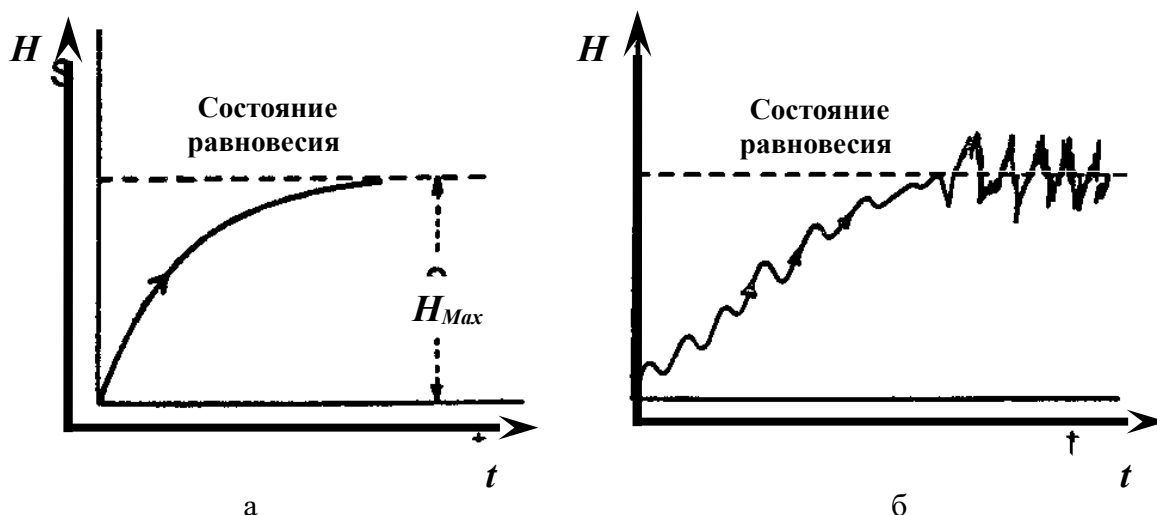


Рис.1. Эволюции изолированного (а) и открытого (б) объектов к состоянию равновесия

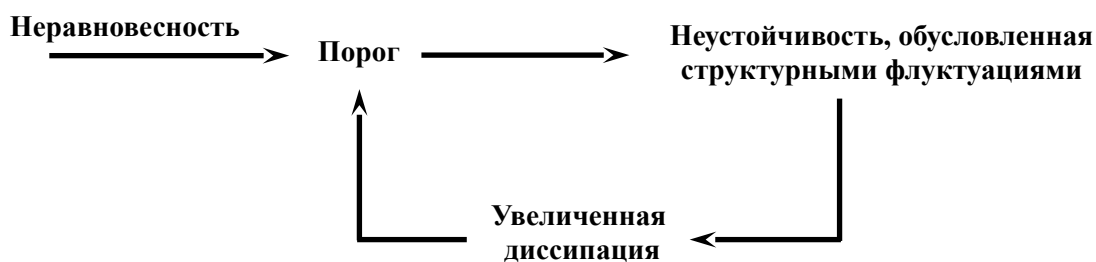


Рис.2. Механизм запуска необратимых процессов в объекте

Причинами возникновения флуктуаций являются первичные необратимые изменения в объекте, вторичные необратимые изменения и ошибочные команды или действия [2].

Первичные необратимые изменения представляют собой события, происходящие при входных воздействиях, значения которых лежат в расчетных диапазонах, а изменения в объекте являются следствием различных процессов старения.

Вторичные необратимые изменения отличаются от первичных тем, что их причиной являются воздействия предыдущих или текущих избыточных нагрузок на элементы объекта. Степень и продолжительность воздействий могут выходить за пределы допустимых значений и вызываться различными источниками энергии: тепловой, механической, химической, электрической и т.д. Источниками воздействий являются соседние элементы, окружающая среда или другие объекты. Обслуживающий персонал также является потенциальным источником вторичных изменений, если его действия приводят к выходу элементов из строя. Следует отметить, что устранение источников воздействий не гарантирует возвращения элементов в работоспособное состояние, так как предыдущая перегрузка могла вызвать появление необратимого повреждения в них.

Ошибочные команды или действия обычно являются следствием самопроизвольных сигналов управления или помех и могут привести к тем же последствиям, что и вторичные необратимые изменения, поскольку их источниками также могут быть соседние элементы (или неучтенная информация), окружающая среда и обслуживающий персонал.

Если любое упорядоченное состояние объекта X рассматривать как макроскопическое, а возникающие неравновесности (отклонения от него) – как микроскопические состояния, и принять их число Δ пропорциональным величине отклонения от равновесия, то тогда производимую объектом физическую энтропию (H) можно представить следующим соотношением:

$$(H) = k \times \ln \Delta, \tag{1}$$

где k – постоянная Больцмана. При этом чем больше Δ , тем с большей вероятностью объект подчиняется статистическим законам в смысле эволюции под действием Δ к наиболее вероятному стационарному состоянию X_H (рис.3). Условие равновесия соответствует $\Delta = 0$; X_H в этом случае является непрерывным расширением этого состояния, т.е. роста Δ .

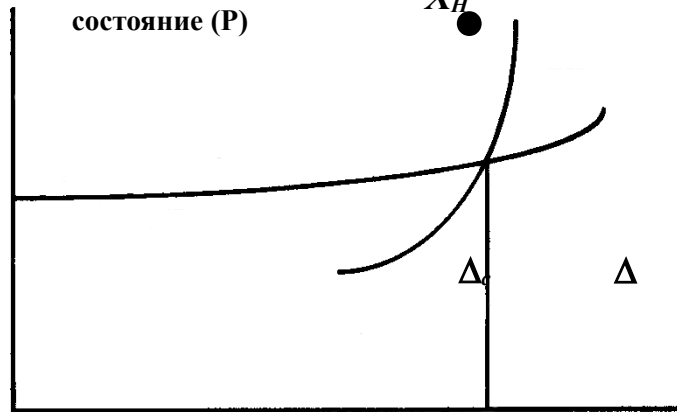


Рис.3. Диаграмма альтернатив эволюции объекта под действием необратимых процессов

Пока Δ мало, объект находится в состоянии равновесия или вблизи него. Когда же Δ достигает некоторого критического значения Δ_c , равновесное состояние становится неустойчивым (рис.4). Область его притяжения начинает сокращаться (с I до II), а область притяжения другого состояния (O), которое представляет собой одно из возможных новых (организованных необратимыми процессами) состояний – расширяться (с 1 до 2). Энтропия начинает изменяться, причем это изменение $d(H)$ можно разложить на две составляющие:

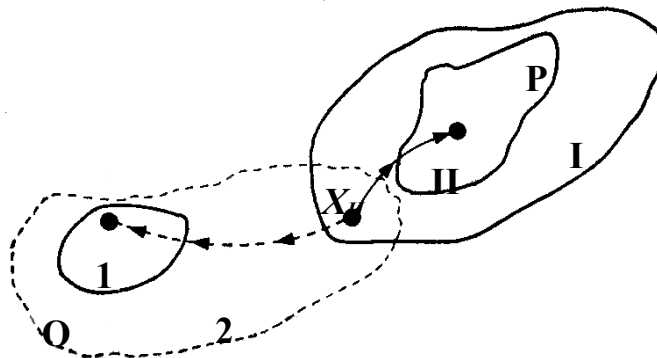


Рис.4. Топология реакций объекта на действие необратимых процессов

$$d(H) = d_e(H) + d_i(H), \tag{2}$$

где $d_e(H)$ – изменение энтропии, обусловленное обменом веществом и энергией с внешней средой, $d_i(H)$ – изменение энтропии, обусловленное необратимыми процессами внутри объекта. При этом энтропия, «вытекающая» из объекта, всегда больше, чем энтропия, поступающая в него (рис.5); разность возникает из-за энтропии, производимой необратимыми

процессами внутри объекта в результате работы диссипативных сил. В результате точка, характеризующая местоположение состояния X_H , выбрасывается из области притяжения состояния P , даже если эта область еще полностью не исчезла (рис.4). Траектория движения точки (т.е. эволюции объекта) совершает скачок из состояния P в состояние O , а состояние P , слившись с состоянием O , «исчезает», т.е. происходит его бифуркация [3].

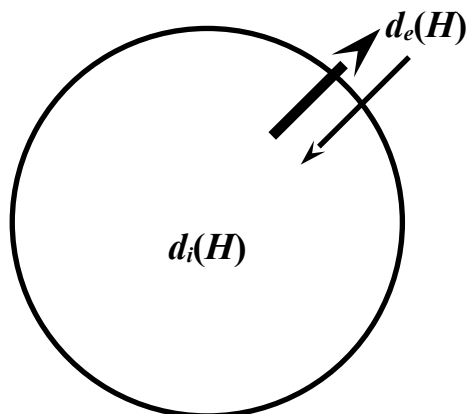


Рис.5. Изменение энтропии объекта

Таким образом, в состояниях, далеких от равновесия, открытым объектам становится присуще явление самоорганизации, приводящее к возникновению новых пространственно-временных структур (упорядоченных состояний Δ), тождественных процессам, приводящим к равновесию из-за взаимной компенсации (перемешивания), поэтому они названы «диссипативными структурами», чтобы отличать их от равновесных структур [1].

Принципиальной особенностью диссипативных структур является то, что, находясь в них, объекты начинают воспринимать те факторы воздействия извне, которые они не восприняли бы в равновесном состоянии. В результате события, которые не могут иметь места в равновесном состоянии, становятся возможными в неравновесных состояниях. В связи с этим актуальным, с точки зрения формирования данных о состоянии объектов, является анализ причин такого поведения, который целесообразно выполнить в окрестности точки, за которой оно начинается, т.е. точки бифуркации, связанной с потерей устойчивости. А поскольку все открытые объекты в данной точке ведут себя одинаково, анализ можно провести с помощью обобщенного математического аппарата.

Математическая основа концепции: потеря устойчивости. В общем виде уравнение, определяющее пространственно-временную эволюцию объекта, имеет вид

$$\frac{\partial X_k}{\partial t} = Z_k(X_i, \lambda), \quad (3)$$

где λ – параметр, позволяющий удерживать объект в неравновесном (или равновесном) состоянии, он также называется внешним, чтобы подчеркнуть открытый характер объекта; Z_k – оператор дифференцирования (в общем случае – частного).

Пусть X_k – стационарное решение уравнения (3). Устойчивость этого состояния может быть проанализирована исследованием эволюции $X_k = X_{Hk} = \delta_k$, где δ_k – малое возмущение (математический аналог Δ на рис.4). Если оно экспоненциально затухает, то стационарное состояние объекта устойчиво. Это имеет место в случае, когда λ меньше некоторого «критического значения» λ_c (по аналогии с Δ_c на рис.4). Когда λ превышает λ_c , может случиться, что возмущение δ_k вместо затухания начнет экспоненциально возрастать, приводя состояние X_{Hk} в неустойчивое. Именно при λ_c у уравнения (3) появятся новые решения, которые в окрестности λ_c часто принимают вид [1]:

$$X_k(\mathbf{r}, t, \lambda) = X_{Hk}(\lambda_c) + \alpha_k \psi_k(\mathbf{r}, t), \quad (4)$$

где $X_{Hk}(\lambda_c)$ – стационарное состояние при $\lambda = \lambda_c$; \mathbf{r} – вектор координат объекта; t – время; α_k – набор «амплитуд», которые надо определить, а $\psi_k(\mathbf{r}, t)$ – функции, которые могут быть получены из Z_k в (3). Общая теория бифуркации обеспечивает способ определения временного изменения амплитуды α_k с помощью системы уравнений типа

$$\frac{d\alpha_k}{dt} = G(\alpha_k, \lambda), \quad (5)$$

которые называются бифуркационными уравнениями. При этом множественность решений уравнения (5) соответствует множественности решения исходного уравнения (3). В связи с этим рассмотрим процессы, посредством которых происходит переход к тому или иному решению. Физически это соответствует переходу с микроскопического уровня изучения эволюции объекта на макроскопический, а математически – к статистическому усреднению, заменяющему в соответствии с (1) микроскопическую динамику.

Пусть $P(\mathbf{r}, t)$ – вероятность застать объект в точке \mathbf{r} в момент времени t . Требуется определить, как эта вероятность эволюционирует во времени. Вероятность $P(\mathbf{r}, t)$ возрастает из-за переходов из других точек \mathbf{r}' и убывает из-за переходов, исходящих из точки (состояния) \mathbf{r} , т.е.

$$\frac{dP(\mathbf{r}, t)}{dt} = \text{«скорость прихода»} - \text{«скорость ухода»} = V - V'. \quad (6)$$

Так как член V учитывает все переходы из начальных точек $\mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r}$, он представляет собой сумму по всем начальным точкам \mathbf{r}' , умноженную на вероятность совершить за единичное время переход $\mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r}$. Таким образом [4]:

$$V = \sum W(\mathbf{r}, \mathbf{r}')P(\mathbf{r}', t), \quad (7)$$

где $W(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – вероятность совершить переход $\mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r}$ за единичное время.

Для «входящих» переходов (V') справедливо соотношение

$$V' = P(\mathbf{r}, t) \sum_{\mathbf{r}' \neq \mathbf{r}} W(\mathbf{r}', \mathbf{r}), \quad (8)$$

где $W(\mathbf{r}', \mathbf{r})$ – вероятность совершить переход $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}'$ (также за единичное время). Тогда уравнение, описывающее эволюцию вероятности $P(\mathbf{r}, t)$, будет иметь вид

$$\frac{dP(\mathbf{r}, t)}{dt} = \sum_{\mathbf{r}'} W(\mathbf{r} - \mathbf{r}')P(\mathbf{r}', t) - P(\mathbf{r}, t) \sum_{\mathbf{r}' \neq \mathbf{r}} W(\mathbf{r}', \mathbf{r}); \quad (9)$$

при этом $\sum_{\mathbf{r}'} W(\mathbf{r}', \mathbf{r}) = 1$, если сумма распространяется и на саму точку \mathbf{r} .

Умножение обеих частей уравнения (9) на \mathbf{r} и интегрирование (или суммирование) по соответствующему интервалу \mathbf{r} дает динамическое уравнение, левая часть которого описывает скорость изменения значения медианы $\langle \mathbf{r} \rangle$ во времени:

$$\frac{d}{dt} \langle \mathbf{r} \rangle = f_1 \{ \langle \mathbf{r} \rangle, \langle \mathbf{r}^2 \rangle, \dots \}, \quad (10)$$

где f_1 – нелинейный полином, поскольку в большинстве случаев вероятности переходов W (скорости ухода и прихода) – нелинейные функции от \mathbf{r} . Аналогично можно получить уравнения, описывающие изменения старших моментов (дисперсии, асимметрии и др.).

Вдали от точек бифуркации функция $P(\mathbf{r}, t)$ имеет, как правило, один максимум. Это означает, что медиана совпадает с наиболее вероятным значением, т.е. модой; в этих случаях член $\langle \mathbf{r}^2 \rangle$ в полиноме f_1 (как и в полиномах старших моментов) можно опустить. В результате уравнение, описывающее эволюцию среднего значения, т.е. динамику объекта на макроскопическом уровне при условии, что входящие в него элементы не взаимодействуют между собой, будет иметь вид [4]

$$\frac{d}{dt} \langle \mathbf{r} \rangle = f_1 \{ \langle \mathbf{r} \rangle, \lambda \}, \quad (11)$$

В окрестности точки бифуркации флуктуации Δ , усиливающиеся внешними воздействиями, приводят к росту флуктуаций объекта, и, как следствие, изменениям описывающих его переменных и/или параметров, причем не только по амплитуде, но и по фазе и частоте (это показывает исследование устойчивости с помощью системы связанных нелинейных дифференциальных уравнений). В результате значимость членов типа $\langle r^2 \rangle$ в уравнениях моментов возрастает, и у функции $P(\mathbf{r}, t)$ появляется несколько максимумов (по крайней мере, два), причем в общем случае они имеют неравную высоту (что в свою очередь вызывает нарушение условия равновероятности альтернатив дальнейшей эволюции объекта). Медиана перестает совпадать с модой и уравнение (11) утрачивает силу. Приход же объекта в новое устойчивое (равновесное) состояние после прохождения точки бифуркации приводит к тому, что число ее максимумов вновь уменьшается до одного за счет их слияния с минимумами; функция $P(\mathbf{r}, t)$ при этом «сжимается» вокруг нового максимума, и режим эволюции среднего восстанавливается.

Представленные в статье материалы могут быть положены в основу разработки модели, позволяющей исследовать информационные возможности каждого из этапов изменения состояния объекта в ходе процесса эволюции с целью разработки критериев для его количественной оценки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди; пер. с англ. М.: Мир, 2002. 461 с.
2. Хенли Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото; пер. с англ. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
3. Касти Дж. Большие системы. Связность, сложность, катастрофы / Дж. Касти; пер с англ. М.: Мир, 1982. 216 с.
4. Николис Дж. Динамика иерархических систем: Эволюционное представление / Дж. Николис; пер с англ. М.: Мир, 1989. 488 с.

Мартынов Владимир Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета (СГТУ)

Martynov Vladimir Vasilievich – doctor of technical sciences, professor, professor of department «Design and computer simulation of the process equipment in the machine and instrument» Saratov State Technical University

Мартынов Павел Владимирович – магистрант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» СГТУ.

Martynov Pavel Vladimirovich – graduate department «Technical Cybernetics and Informatics» SSTU.

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 65.011.56

А.Ю. Набилкин, С.А. Кравченко, В.П. Бирюков

**ВЫБОР СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ФОРМОЙ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ**

В статье рассматривается актуальность и производится выбор структуры автоматизированной системы управления формой нежестких валов при токарной обработке. Предлагаемая система по измерениям диаметра вала в пяти критических точках производит компенсацию влияния возмущающих воздействий по всей длине вала.

Нежесткий вал, токарная обработка, погрешность обработки, регрессионный анализ, математическая модель, автоматизированная система управления

A.Y. Nabilkin, S.A. Kravchenko, V.P. Biryukov

SELECTION OF STRUCTURE OF THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF NONRIGID SHAFT FORM DURING THE LATHING

In article the actuality and the selection of structure of an automated control system of a nonrigid shafts form with lathing is considered. The offered system makes compensation of disturbances in all length of a shaft by measurements of diameter of a shaft in five critical points.

Nonrigid shaft, lathing, processing error, regression analysis, mathematical model, automated control system

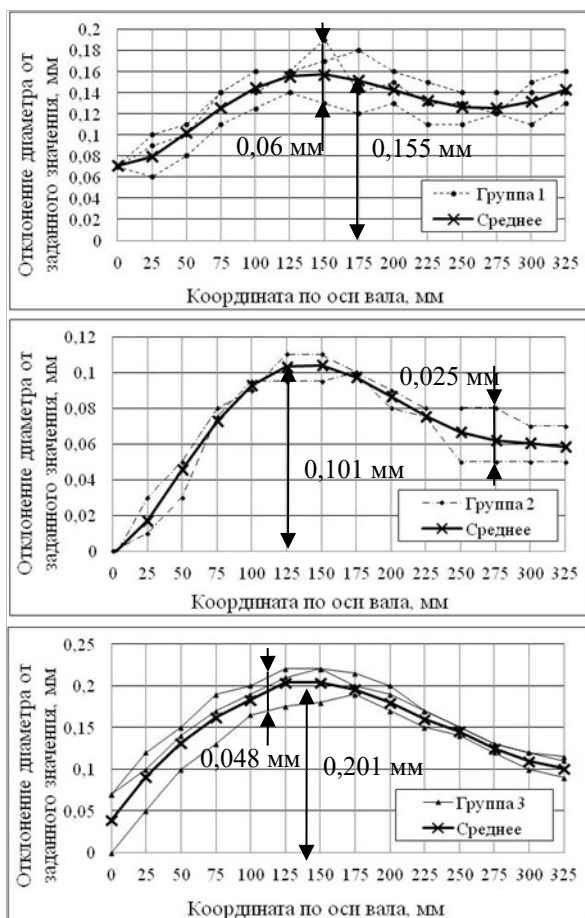


Рис. 1. Анализ погрешности формы вала для валов номинальных диаметров а) 26,8; б) 25,3; в) 23,6.

Постановка задачи. Особенностью токарной обработки нежестких валов является их большая деформация под действием сил резания, что приводит к бочкообразности обработанных изделий и заставляет уходить на режимы с уменьшенными силами резания, и, соответственно, производить обработку на пониженных производительностях [1]. Применение люнетов позволяет применять более жесткие режимы резания, однако требуются большие затраты времени на предварительную обработку шеек под люнет, переустановку люнетов, детали и т.д. Поэтому является актуальной задача создания системы управления, обеспечивающей компенсацию больших деформаций нежестких валов и позволяющей производить их обработку на более высоких скоростях [2]. В данной работе производится выбор структуры системы управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке в центрах путем отслеживания режущей кромкой резца деформации вала в процессе точения.

Анализ погрешности обработки нежестких валов. На токарном станке с ЧПУ 16A20 Ф3 протачивалась группа заготовок длиной 325 мм на диаметры 27 мм (3 шт.), 26,5 мм (2 шт.), 24,8 мм (3 шт.) при режимах реза-

ния: подача – 0,25 мм/об, глубина резания – 0,6 мм, скорость резания – 46,3 м/мин. Затем микрометром с точностью 0,001 мм с шагом 25 мм производился замер диаметров получившихся в результате обработки деталей. На рис. 1 приведены графики отклонений диаметров от номинальных значений.

Графики показывают наличие для каждой группы валов систематической составляющей погрешности диаметра вала, которая принимает максимальные значения 0,155; 0,101; 0,201 мм в средней части валов. Кроме систематической погрешности группы валов имеют случайные составляющие величиной от 0,025 до 0,048 мм.

Систематические ошибки определяются средними смещениями левой и правой бабок и деформацией отжима заготовки под действием сил резания. Часто они имеют бочкообразную форму, обычно описываемую моделью деформации нежесткого вала при токарной обработке [1, 3]. Экспериментальные образцы имеют точки перегиба на расстоянии 25-30 мм от левого и 50-75 мм от правого края заготовки (рис. 1), что не позволило описать погрешность классической моделью с требуемой точностью (коэффициент множественной детерминации составил 0,59).

Поэтому систематическая погрешность описана полиномиальным регрессионным уравнением (2) [4-5].

$$\delta(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 + b_5x^5 \quad (1)$$

где x – координата анализируемой точки по длине вала.

Полученные оценки коэффициентов моделей, показателей адекватности, ошибок прогноза приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сводные данные по регрессионному анализу

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	R^2	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{табл}}$	$2s_{\text{ост}}$
1 группа	0,071	-0,00013	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$-2,2 \cdot 10^{-7}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$-6,6 \cdot 10^{-13}$	0,853	19,21	1,5	0,02
2 группа	-0,0019	0,00039	$1,96 \cdot 10^{-5}$	$-2 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-10}$	$-7,1 \cdot 10^{-13}$	0,95	50,26	1,61	0,0094
3 группа	0,064	0,0016	$2,34 \cdot 10^{-6}$	$-7,3 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$-1,73 \cdot 10^{-13}$	0,95	19,21	1,5	0,019

Регрессионные уравнения имеют вид ($u_i = x^i$)

$$\hat{\delta}_1 = 0,071 - 0,00013u_1 + 2,38 \cdot 10^{-5}u_2 - 2,09 \cdot 10^{-7}u_3 + 6,42 \cdot 10^{-10}u_4 - 6,61 \cdot 10^{-13}u_5,$$

$$\hat{\delta}_2 = -0,0019 + 0,00039u_1 + 1,96 \cdot 10^{-5}u_2 - 1,98 \cdot 10^{-7}u_3 + 6,5 \cdot 10^{-10}u_4 - 7,1 \cdot 10^{-13}u_5,$$

$$\hat{\delta}_3 = 0,064 + 0,0016u_1 + 2,34 \cdot 10^{-6}u_2 - 7,34 \cdot 10^{-8}u_3 + 2,2 \cdot 10^{-10}u_4 - 1,73 \cdot 10^{-13}u_5.$$

Экспериментальные и рассчитанные по моделям погрешности обработки приведены на рис. 2. Анализ графиков и показатели адекватности показывают, что построенные модели с достаточной точностью описывают систематические погрешности обработки групп валов. Анализ разброса экспериментальных диаметров вокруг систематических составляющих показывает, что существуют пять участков, на которых случайные составляющие имеет максимальные значения: это правый и левый края, середина вала, и точки перегиба. Это позволяет сделать вывод, что если обеспечить отработку систематических погрешностей и добиться допустимых значений погрешностей обработки в этих пяти точках, то весь вал будет иметь требуемую точность обработки.

Данное положение положено в основу системы управления диаметром нежесткого вала по всей его длине. На рис. 3 приведена функциональная схема системы управления продольным профилем нежесткого вала в процессе токарной обработки, позволяющая путем отслеживания режущей кромкой резца деформации заготовки производить обра-

ботку при повышенных значениях силы резания и тем самым повысить производительность процесса.

Система управления комбинированная каскадная. Она включает прямой канал управления для компенсации систематической ошибки и контур обратной связи для обработки случайной составляющей ошибки путем дополнительной корректировки положения режущей кромки резца по поперечной оси.

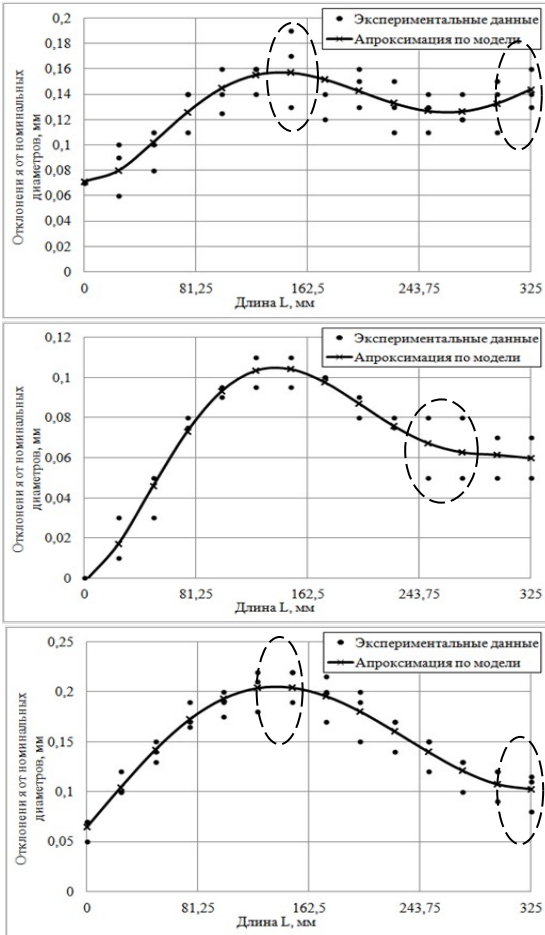


Рис. 2. Экспериментальные и рассчитанные по модели деформации валов

Вычислительное устройство ВУ1 для каждого положения резца по продольной оси, измеряемого датчиком D_x , по построенной математической модели систематической ошибки определяет траекторию движения режущей кромки резца по продольной оси $y_{np}(t)$ и выдает ее в виде задания системе управления положением резца по поперечной подаче, являющейся внутренним контуром каскадной системы. Объектом управления внутреннего контура является система привода поперечной подачи и процесс резания (формирующий момент сопротивления данному приводу).

Пятиканальный регулятор Рег 1 по результатам измерения диаметра обработанных деталей в выбранных пяти точках датчиком D_d определяет управляющее воздействие в виде корректировок координат положения режущей кромки в каждой из пяти точек. Аппроксимирующее устройство АУ преобразует дискретную траекторию в непрерывную и выдает ее в виде поправки $y(t)$ к управляющему воздействию прямого канала управления $y_{np}(t)$.

Объектом управления внешнего контура является система управления положением режущей кромки резца по поперечной оси, процесс резания, процесс измерения диаметров в заданных пяти точках группы обработанных деталей, вносящих во внешний контур обратной связи

транспортное запаздывание.

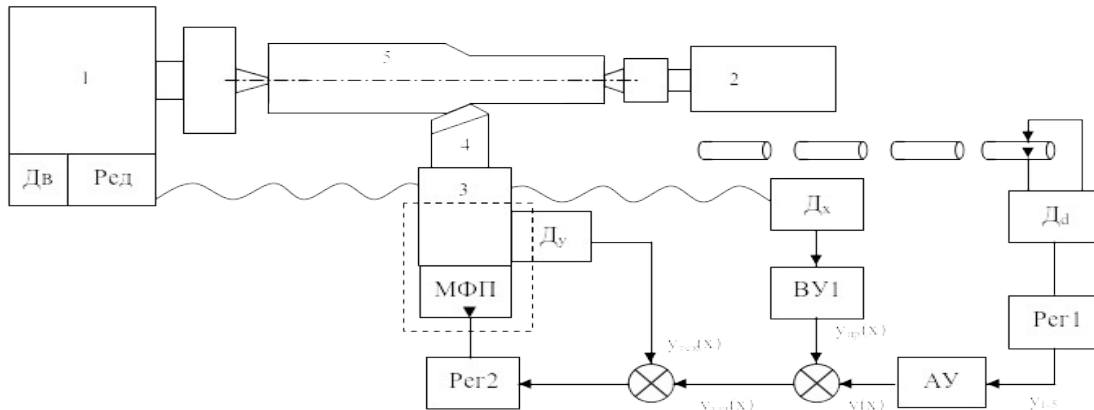


Рис. 3. Функциональная схема системы управления продольным профилем нежесткого вала

в процессе токарной обработки

1 – передняя бабка, 2 – задняя бабка, 3 – суппорт, 4 – режущий инструмент, 5 – заготовка,
МФП – многоступенчатый фрикционный привод, ВУ1 - вычислительное устройство, Рег1 – ЛКГ-регулятор,
Рег2 – ПИД-регулятор, D_d – система измерения диаметра обработанных валов в 5-ти точках,
 D_x – датчик положения режущей кромки по оси x , D_y – датчик положения режущей кромки по оси y

Величина запаздывания зависит от количества обработанных деталей до получения результатов измерений, т.е. зависит от используемых технических средств и организации процесса контроля. Таким образом формируется заданная траектория движения режущей кромки резца по поперечной оси в процессе точения $y_{зад}(t)$, обеспечивающая отработку систематической и низкочастотной части случайной составляющей погрешностей обработки нежестких валов.

Структурная схема системы управления представлена на рис. 5. Следует обратить внимание, что данная схема только показывает принцип работы системы и не предназначена для анализа динамики системы. Это связано с тем, что внешний и внутренний контур работают в различных временных масштабах. Внешний контур дискретный. Цикл расчета управляющего воздействия внешнего контура производится после ввода данных измерения диаметра в контролируемых точках очередной детали. Внутренний контур работает непрерывно в процессе обработки очередной детали. При этом система управления положением режущей кромки по поперечной оси обрабатывает последнее управляющее воздействие внешнего контура.

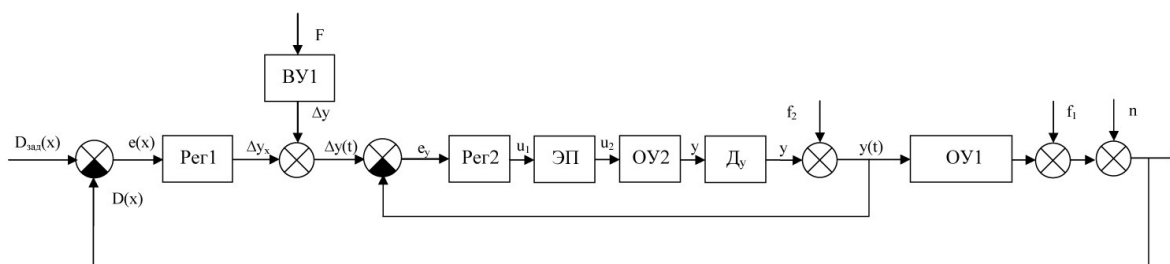


Рис. 4. Структурная схема системы управления

Рег1 – ЛКГ-регулятор, ВУ1 – вычислительное устройство, Рег2 – ПИД-регулятор,
ЭП – электропривод; ОУ2 – объект управления 2 (привода суппорта токарного станка);
 D_y – датчик перемещения суппорта по оси Y ; ОУ1 – объект управления 1 (процесс резания)

Выводы

1. Показана актуальность и предложена структурная схема системы управления профилем нежестких валов в процессе токарной обработки.

2. Система является многомерной каскадной. Внешний контур по измерениям диаметра вала в пяти критических точках формирует траекторию движения резца по оси Y , компенсирующую влияние систематической и случайной погрешностей обработки нежестких валов. Внутренний контур производит отработку заданной траектории движения путем управления двигателем поперечной подачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маталин А.А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. Л.: Машиностроение, 1985, 496 с.
2. Невельсон М.С. Автоматическое управление точностью металлообработки / М.С. Невельсон. Ленинград.: Машиностроение, 1973. 176 с.
3. Перельгина Т.И. Технологическое обеспечение точности токарной обработки нежестких валов с применением Mathcad / Т.И. Перельгина // Информационные технологии, системы автоматизированного проектирования и автоматизация: сб. тр. всеросс. науч. конф. Саратов: СГТУ, 2010. С. 85-89.
4. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. Книга 1 / Н. Дрейпер, Г. Смит. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

5. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. Книга 1 / Н. Дрейпер, Г. Смит. М.: Финансы и статистика, 1987. 352 с.

Набилкин Артем Юрьевич –

аспирант кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета)

Artyom Y. Nabilkin –

Postgraduate of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management» (branch of Saratov State Technical University)

Кравченко Станислав Алексеевич –

аспирант кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета)

Stanislav A. Kravchenko –

Postgraduate of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management» (branch of Saratov State Technical University)

Бирюков Владимир Петрович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета)

Vladimir P. Biryukov –

Dr. Sc., professor of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management» (branch of Saratov State Technical University)

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 65.011.56

А.Ю. Набилкин, С.А. Кравченко, В.П. Бирюков

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ
ФОРМОЙ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ**

В статье производится построение математических моделей объекта управления по управляющему воздействию и формирующих фильтров возмущающих воздействий для системы управления формой нежестких валов при токарной обработке.

Нежесткий вал, транспортное запаздывание, пространство состояния, формирующий фильтр, спектральная плотность, нелинейное программирование

A.Y. Nabilkin, S.A. Kravchenko, V.P. Biryukov

**MATHEMATICAL MODEL OF CONTROLLED OBJECT OF
NONRIGID SHAFTS FORM WITH LATHING**

Mathematical models of controlled object by control action and generating filter of disturbances for a control system of a nonrigid shafts form with lathing designed in the article.

Nonrigid shaft, transport delay, state-space, generating filter, spectral density, non-linear programming

Произведен выбор структуры системы управления формой нежестких валов при токарной обработке и приведены функциональная и структурная схемы системы (рис. 1). В данной работе производится построение математических моделей объекта управления системы по управляющему воздействию и формирующих фильтров возмущающих воздействий для рассматриваемой системы управления.

Для удобства анализа в работе за период дискретизации принята продолжительность обработки одной детали $t_{обp} = 6$ мин. Тогда период дискретизации в относительных единицах равен $\Delta T = 1$, а параметры по переходам системы внешнего контура (диаметр обработанных деталей, значения управляющих воздействий) можно рассматривать как последовательные значения временных рядов с относительным шагом равным единице. Корреляционные функции также будут иметь относительное время, а спектральная плотность будет иметь относительную частоту и измеряться в *количестве колебаний на период дискретизации* ($f/\Delta T$).

Математическая модель объекта управления по управляющим воздействиям. Для управления продольным профилем нежесткого вала используются пять базовых точек по длине вала, в которых возможны наибольшие отклонения диаметров от заданных значений. Тогда объект управления будет включать 5 каналов с пятью управляющими воздействиями на входе в виде положения резца по поперечной оси и пятью выходами в виде диаметров вала в пяти базовых точках. Структурная схема объекта управления продольным профилем приведена на рис. 1. Транспортное запаздывание z в зависимости от используемого оборудования и организации процесса контроля принято от 1 до 4 деталей. На начальном этапе синтеза $z = 4$, а затем исследуется, что повышение эффективности управления при запаздывании $z = 3, z = 2, z = 1$, что может быть обеспечено лучшей организацией процесса измерения обработанных изделий.

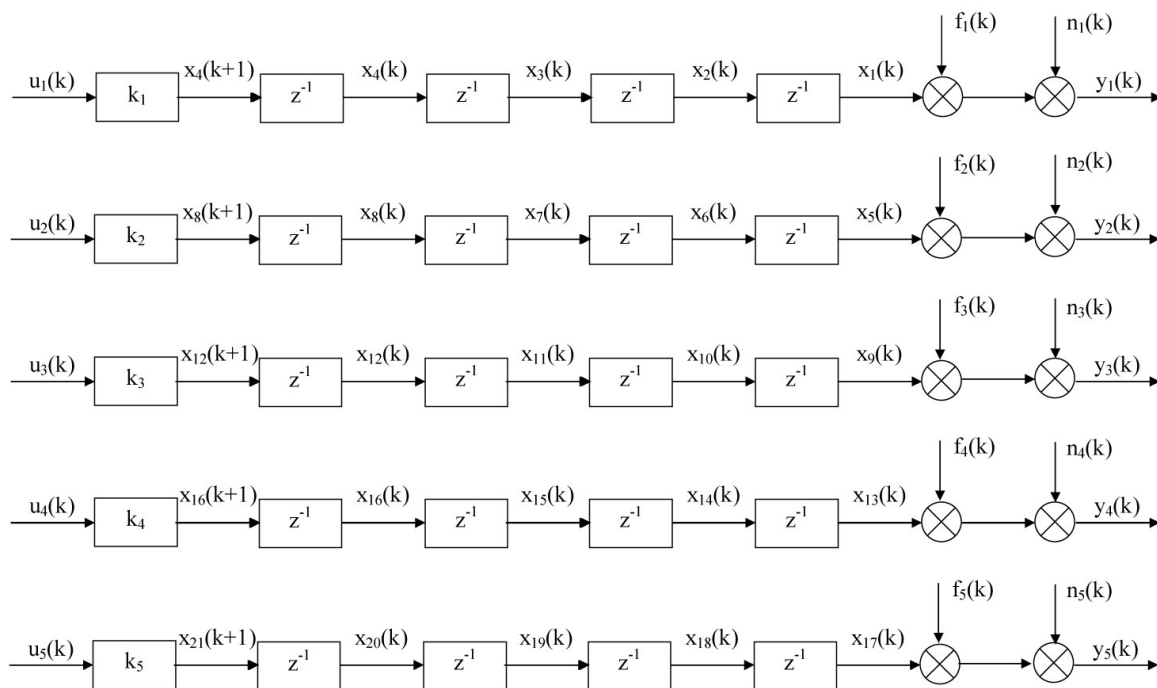


Рис. 1. Структурная схема модели объекта управления

На рис. 1 обозначено: z^{-1} – звено транспортного запаздывания на 1 шаг, равный продолжительности обработки одной детали; $k_i = 2, i=1,5$ – коэффициент передачи перемещения режущей кромки резца по поперечной оси на диаметр обработанного вала; $x_{1...20}(k)$ – переменные состояния, необходимые для описания транспортного запаздывания стадии измерения диаметров обработанных валов; $y_1(k) - y_5(k)$ – выходные переменные – измеренные на k -м шаге диаметры очередного обработанного вала; $u_1(k) - u_5(k)$ – управляющие воздействия – рассчитанные значения положения режущей кромки инструмента в используемых для управления точках по длине заготовки; $n_1(k) - n_5(k)$ – сигналы шума измерения.

На основании построенной структурной схемы модель объекта управления по управляющему воздействию является дискретной и имеет вид:

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &= x_2(k) & x_{11}(k+1) &= x_{12}(k) \\
 x_2(k+1) &= x_3(k) & x_{12}(k+1) &= k_3 \cdot u_3(k) \\
 x_3(k+1) &= x_4(k) & x_{13}(k+1) &= x_{14}(k) \\
 x_4(k+1) &= k_1 \cdot u_1(k) & x_{14}(k+1) &= x_{15}(k) \\
 x_5(k+1) &= x_6(k) & x_{15}(k+1) &= k_4 \cdot u_4(k) \\
 x_6(k+1) &= x_7(k) & x_{16}(k+1) &= x_{17}(k) \\
 x_7(k+1) &= x_8(k) & x_{17}(k+1) &= x_{18}(k) \\
 x_8(k+1) &= k_2 \cdot u_2(k) & x_{18}(k+1) &= x_{19}(k) \\
 x_9(k+1) &= x_{10}(k) & x_{19}(k+1) &= x_{20}(k) \\
 x_{10}(k+1) &= x_{11}(k) & x_{20}(k+1) &= k_5 \cdot u_5(k)
 \end{aligned}
 \left\{ \begin{array}{l}
 y_1(k) = x_1(k) + f_1(k) + n_1(k) \\
 y_2(k) = x_5(k) + f_2(k) + n_2(k) \\
 y_3(k) = x_9(k) + f_3(k) + n_3(k) \\
 y_4(k) = x_{13}(k) + f_4(k) + n_4(k) \\
 y_5(k) = x_{17}(k) + f_5(k) + n_5(k)
 \end{array} \right. \quad (1)$$

В пространстве состояния модель (1) имеет вид [2-3]:



где x – вектор параметров состояния размерностью $n=20$; u – вектор управляющих воздействия размерностью $r=5$ (u_1-u_5); y – вектор управляемых переменных размерностью $m=5$ (y_1-y_5); f – вектор возмущающих воздействий размерностью $m=5$; n – вектор белого шума ошибки измерения управляемых переменных.

Матрицы А, В, С и D имеют вид:

$$\omega_{\delta} = \frac{\dot{\delta}_p}{1,25\delta_{\max}} = \frac{0,0008}{1,25 \cdot 0,004} = 0,16 \text{ рад/период},$$

$$f_{\delta} = \frac{0,16}{2\pi} = 0,025 \text{ кол/период дискретизации и окончательно}$$

$$f_{\delta} \leq 0,025 \text{ кол/период дискретизации}$$

На рис. 2 представлены возможные частотные диапазоны возмущающих воздействий при изменении температуры элементов станка и в процессе износа резца. Частотный диапазон определяется из условия теоремы Колесникова – два опроса на период максимальной частоты.

Ошибка измерения диаметра представлена случайным процессом типа белый шум с дисперсией, определяемой классом точности прибора. При ошибке прибора, взятой с 95 процентной доверительной вероятностью $\delta = 0,001 \text{ мм}$ дисперсия белого шума будет равна $\delta = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$. При анализе системы дисперсия белого шума повышена вследствие возможности наличия других возмущающих воздействий с характеристиками типа белый шум.

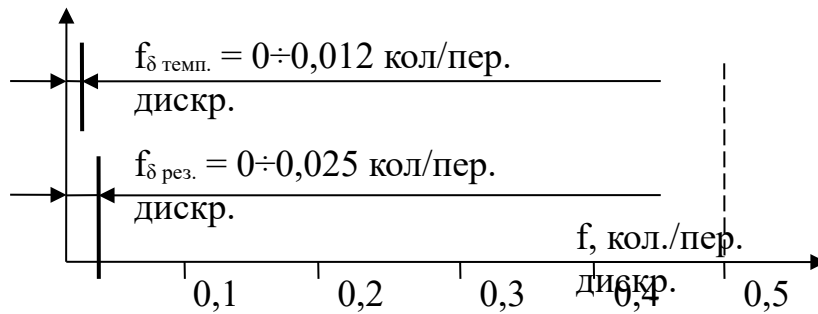


Рис. 2 представлены возможные частотные диапазоны возмущающих воздействий

Общий вид кривой спектральной плотности (рис. 3) обеспечивает охват спектральной плотности возмущений по температуре и износу резца. На данном этапе для упрощения модели формирующего фильтра принят экспоненциальный вид кривой спектральной плотности

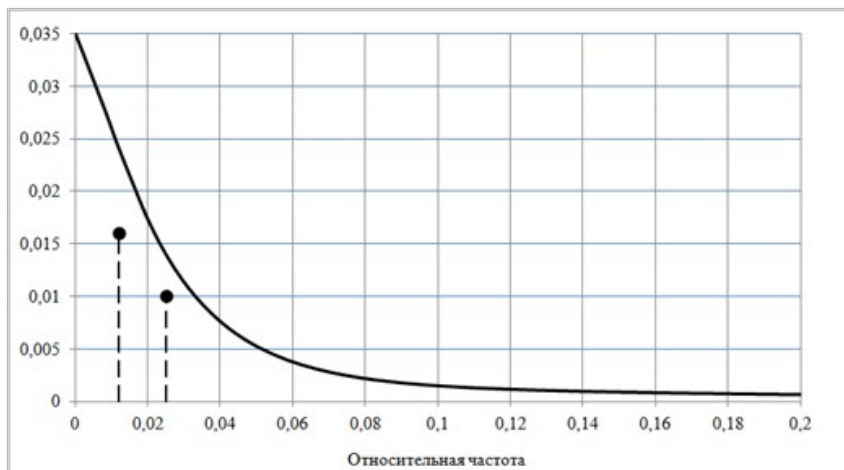


Рис. 3. График спектральной плотности возмущающего воздействия, рассчитанный аналитически

Аппроксимация спектральной плотности дробно-рациональной функцией с четными степенями частоты произведена путем решения задачи нелинейного программирования в среде MatLab [6-9].

Полученная с помощью факторизации передаточная функция формирующего фильтра уточнена путем решения задачи нелинейного программирования [8]. При этом подобраны

такие параметры фильтра, чтобы сумма квадратов отклонений расчетной спектральной плотности от экспериментальной была минимальной. Полученная в результате подстройки модель фильтра имеет вид

$$W_{\text{фф}}(p) = \frac{0.08359p}{1.936p^3 + 5.594p^2 + 0.1931p + 0.00053}$$

Графики оценки заданной и расчетной спектральных плотностей (рис. 4), показывают достаточную для практики точность их совпадения.

Спектральная плотность суммарного возмущения включает полученные диапазоны частот, а также белый шум, учитывающий ошибку измерения диаметра и другие возможные возмущения. Вид спектральной плотности в области низких частот на данном этапе не играет большой роли, т.к. эффективность системы управления с обратной связью при любом виде спектральной плотности возмущения имеет максимальную эффективность в области низких частот. Кроме того, эффективность системы управления обычно оценивается коэффициентом эффективности, показывающим относительное снижение дисперсии выходной переменной при замыкании системы управления.

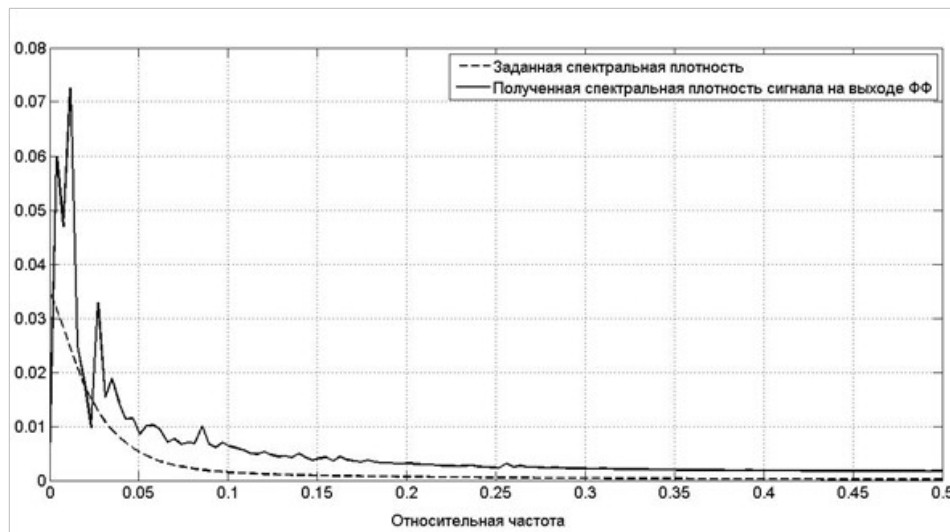


Рис. 4. Сравнение полученной и заданной спектральных плотностей возмущений

Полученная модель формирующего фильтра в дискретной форме имеет вид

$$W_{\text{фф}}(z) = \frac{0.001z^2 - 0.0006z - 0.0004}{z^3 - 2.024z^2 + 1.08z - 0.0561}$$

Корни характеристического уравнения находятся в пределах единичного круга: 0.9969, 0.9692, 0.0580, что говорит об устойчивости формирующего фильтра.

Выводы.

1. В качестве основных возмущающих воздействий рассмотрены изменение температуры элементов станка, износ инструмента, ошибку измерения диаметра обработанных деталей.

2. На основании литературных данных получены оценки частотных составляющих спектральной плотности рассмотренных возмущений и произведено построение математической модели формирующего фильтра, генерирующего случайный процесс с полученной спектральной плотностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем

управления / В. Стрейц. М.: Наука, 1985. 294 с.

2. Квакернак Х. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернак, Р. Сиван. М.: Мир. 1977. 654 с.

3. Маталин А.А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. Л.: Машиностроение, 1985, 496 с.

4. Технология машиностроения. В 2 Т. / Под ред. А.М. Дальского. М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. Т.1. 564с. Т.2. 640 с.

5. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакшин. М: Машиностроение, 1966. 556 с.

6. Венгеров А.А. Прикладные вопросы оптимальной линейной фильтрации / А.А. Венгеров, А.А. Щаренский. М.: Энергоиздат, 1982. 192 с.

7. Бакалов В.П. Цифровое моделирование случайных процессов / В.П. Бакалов. М.: Сайнс-пресс, 2002. 90 с.

8. Мурин С.В. Построение формирующего фильтра для генерации случайного сигнала / С.В. Мурин, В.П. Бирюков // Проблемы прочности, надежности и эффективности: сб.науч.тр. Саратов: СГТУ, 2007. С. 222-225.

9. Медведев В.С. Control System Toolbox / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. М.: Диалог МИФИ, 1999. 287 с.

Набилкин Артем Юрьевич –

аспирант кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета)

Artyom Y. Nabilkin –

Postgraduate of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management» (branch of Saratov State Technical University)

Кравченко Станислав Алексеевич –

аспирант кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета)

Stanislav A. Kravchenko –

Postgraduate of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management (branch of Saratov State Technical University)

Бирюков Владимир Петрович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета)

Vladimir P. Biryukov –

Dr. Sc., professor of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management (branch of Saratov State Technical University)

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 65.011.56

А.Ю. Набилкин, С.А. Кравченко, В.П. Бирюков

**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОМЕРНОГО
СТОХАСТИЧЕСКОГО ЛКГ-РЕГУЛЯТОРА ФОРМЫ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ
ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ**

В работе на основе методики синтеза стохастического линейно-квадратичного регулятора создан пятиканальный регулятор, который с учетом дальнейшей интерполяции управляющих воздействий на всю длину вала позволяет управлять профилем вала по всей его длине. Методом компьютерного моделирования показана эффективность разработанной системы управления.

Нежесткий вал, формирующий фильтр, фильтра Калмана, многомерный стохастический линейно-квадратичный гауссов регулятор, уравнение Риккати, оптимальное управление

A.Y. Nabilkin, S.A. Kravchenko, V.P. Biryukov

SYNTHESIS AND EFFICIENCY ANALYSIS OF MULTIVARIABLE STOCHASTIC LQG-REGULATOR OF NON-RIGID SHAFTS FORM IN LATHING

In the article five-channel regulator is created on a basis of stochastic linear-quadratic regulator synthesis methodology, allowing shaft profile control along its length considering further interpolation of control inputs along the shaft length. Efficiency of the developed system is shown by computer simulation.

Non-rigid shaft, generating filter, Kalman filter, the multivariate stochastic linear-quadratic Gaussian regulator, Riccati equation, optimal control

В данной работе производится синтез и анализ эффективности многомерного стохастического ЛКГ регулятора системы управления обработкой нежестких валов.

Для построения пятиканального регулятора использована хорошо известная процедура синтеза дискретного линейно-квадратичного стохастического регулятора выхода [1-6]. Во-первых, это автоматически обеспечило синтез многоканального регулятора, во-вторых, получен оптимальный с точки зрения отработки статистических возмущений с заданными характеристиками регулятор. Так как процедура синтеза ЛКГ-регулятора разработана для входных сигналов типа белый шум, то были исследованы статистические характеристики возмущающих воздействий, построены модели формирующих фильтров с белым шумом на входе. Построение расширенной модели объекта с учетом формирующих фильтров позволило получить типовую структуру объекта управления с белым шумом на входе для синтеза ЛКГ-регулятора. На данном этапе принято допущение, что ошибка отработки задающего воздействия внутренним контуром пренебрежимо мала, и при синтезе ЛКГ регулятора внутренний контур заменен безинерционным звеном с единичным коэффициентом передачи. Расширенная модель объекта управления имеет вид:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + n(k),$$

где x – вектор параметров состояния размерностью $n=40$; u – вектор входных воздействий, включающий управляющие воздействия размерностью; $r=5$ (u_1-u_5) и случайный процесс типа белый шум размерностью $f=5$ для формирования возмущающих воздействий; y – вектор управляемых переменных размерностью $m=5$ (y_1-y_5); n – белый шум размерностью $f=5$ ошибки измерения управляемых переменных. Матрицы состояния $A_{40 \times 40}$, управления $B_{40 \times 5}$, выхода $C_{5 \times 40}$, проходимая $D_{5 \times 5}$ ввиду их громоздкости, не приводятся.

Синтез многомерного стохастического линейно-квадратичного гауссова регулятора. Линейно-квадратичный стохастический регулятор, включает две составляющие [1-4]: оптимальный фильтр, вычисляющий оценку состояния объекта управления в виде условного среднего при заданных значениях управляющих воздействий и наблюдений выходного сигнала; оптимальный детерминированный регулятор, определяющий линейную обратную

связь относительно оцениваемого состояния объекта. В качестве критерия оптимальности используется среднее значение квадратичного функционала

$$J(u) = E \sum_{k=1}^N y[k]^T R_1 y[k] + u[k]^T R_2 u[k] \quad (2)$$

где R_1 – диагональная матрица размерности $m \times m$ весовых коэффициентов вклада координат выхода управления в минимизируемую квадратичную ошибку системы; R_2 – диагональная матрица размерности $r \times r$ весовых коэффициентов мощности управляющих воздействий, $r_{ii} > 0$, $r_{ij} = 0$ при $i \neq j$.

Данный функционал является обобщенным критерием, объединяющим квадратичную интегральную ошибку (первый элемент) и расход энергии на управление (второй элемент). Выбор соотношений матриц весовых коэффициентов R_1 и R_2 обеспечивает получение минимально возможной ошибки для заданных координат при допустимых диапазонах изменения управляющих воздействий. Оптимальный закон управления имеет вид [1-6]:

$$u = -K \cdot \hat{x},$$

где K – матрица линейного регулятора, определяемая выражением

$$K = (R_2 + B^T (C^T R_1 C + P) B)^{-1} B^T (C^T R_1 C + P) A, \quad (3)$$

\hat{x} – оцениваемое состояние объекта, определяемое уравнением состояния наблюдающего устройства:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + F(y(k) - C\hat{x}(k) - D\hat{x}(k)), \quad (4)$$

где F – матрица внутренней обратной связи фильтра Калмана, определяемая выражением: $F = ASC^T (V_2 + CSC^T)^{-1}$, P , S – симметричные положительно определенные ($n \cdot n$) матрицы, определяемые уравнениями Риккати:

$$\begin{aligned} P &= R_1 + A^T P A - A^T P B (R_2 + B^T P B)^{-1} B^T P A \\ S &= A S A^{-1} - A S C^T (V_2 + C S C^T)^{-1} C S A^T + V_1 \end{aligned} \quad (5)$$

V_1, V_2 – ковариационные матрицы белых шумов возмущающих воздействий и ошибок наблюдений.

Синтез ЛКГ-регулятора и наблюдателя произведен в системе MatLab [4-6]. С помощью функции lqr получена матрица регулятора, а с помощью функции kalman модель наблюдающего устройства на основе фильтра Калмана, обеспечивающая фильтрацию измеряемых параметров пространства состояний объекта как условных средних при заданных значениях управляющих воздействий и выходных переменных. Полученная матрица регулятора имеет вид:

$K =$

0	-1,12E-15	-5,72E-16	1,40E-14	0	0	5,34E-16	-9,33E-16	-2,97E-14	0	0	1,50E-17	-2,47E-18	3,89E-16	0	0	-1,14E-17	1,96E-16	-3,35E-14	0
0	7,14E-16	1,20E-14	1,21E-13	0	0	1,60E-16	-4,70E-15	2,38E-14	0	0	-7,36E-18	4,84E-17	-4,12E-15	0	0	-3,47E-17	1,25E-16	1,16E-14	0
0	1,62E-16	-6,20E-15	1,93E-14	0	0	-1,80E-17	-3,59E-16	4,90E-15	0	0	-2,76E-18	-1,10E-16	-4,35E-16	0	0	-3,81E-18	-9,48E-17	2,99E-15	0
0	-1,56E-16	2,48E-15	-4,92E-15	0	0	-7,84E-16	1,79E-14	4,52E-14	0	0	-1,95E-18	-1,30E-16	4,85E-15	0	0	4,56E-17	3,48E-16	-4,79E-14	0
0	-4,82E-16	-5,57E-15	-2,37E-14	0	0	2,74E-18	4,79E-19	3,36E-15	0	0	-1,13E-19	2,31E-19	-8,42E-20	0	0	4,01E-20	1,79E-19	-4,35E-16	0
0	1,85E-15	7,34E-16	4,94E-14	0	0,026616	0,151934	-0,0018	1,85E-16	6,87E-16	6,13E-15	-5,04E-16	-3,11E-15	5,80E-15	1,54E-17	-6,18E-15	2,84E-15	1,53E-15	1,38E-14	-6,26E-15
0	-6,22E-16	-1,53E-14	1,13E-14	0	7,08E-15	5,34E-14	1,04E-15	0,026616	0,151934	-0,0018	-1,62E-15	-9,76E-15	-7,84E-15	2,19E-15	6,08E-15	3,92E-16	-1,31E-15	-6,36E-15	-5,56E-15
0	-3,29E-16	-1,78E-15	-8,46E-16	0	-2,96E-15	-1,07E-15	1,32E-14	-3,90E-15	-2,20E-14	-7,58E-15	0,026616	0,151934	-0,0018	2,71E-15	1,50E-14	4,41E-16	6,34E-15	3,78E-14	1,95E-15
0	7,11E-16	2,96E-14	1,87E-14	0	-1,26E-15	9,75E-15	-1,20E-14	-2,89E-15	-2,05E-14	-6,77E-16	-3,28E-15	-1,32E-14	-9,11E-15	0,026616	0,151934	-0,0018	3,61E-15	2,10E-14	1,93E-15
0	-2,32E-17	-2,26E-17	5,90E-16	0	-1,30E-15	-9,99E-15	-3,51E-15	3,29E-15	2,00E-14	-2,23E-16	-3,44E-16	-2,23E-15	-5,93E-15	-5,76E-16	-1,00E-14	-5,60E-17	0,026616	0,151934	-0,0018

Формирование многомерного регулятора (ММО регулятора), произведено путем объединения фильтра Калмана и регулятора. Структурная схема полученного многомерного регулятора приведена на рис. 1.

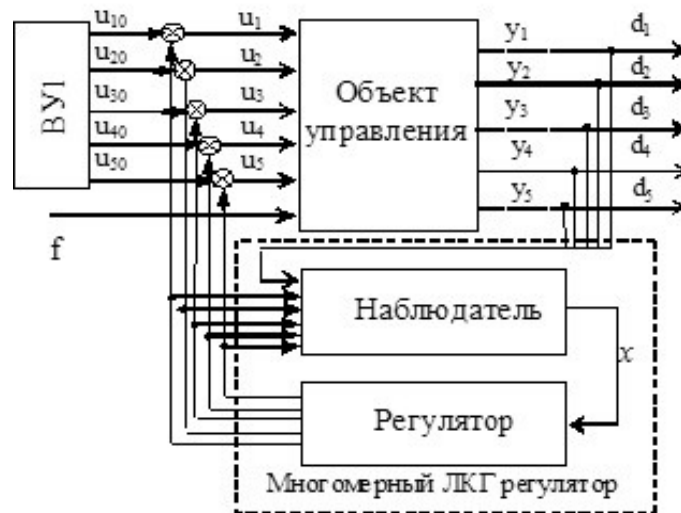


Рис.1. Структурная схема многомерной системы управления

Анализ эффективности построенного регулятора продольного профиля. Анализ эффективности построенного регулятора произведен методом математического моделирования работы системы в MatLab при подаче возмущающих воздействий с полученными характеристикам. На рисунке 2 приведены результаты моделирования в виде графиков регулируемой переменной для разомкнутой и замкнутой систем для одной из исследуемых точек по множеству обрабатываемых заготовок при различных значениях транспортного запаздывания $z=4, 3, 2, 1$.

Для оценки эффективности работы системы использовался коэффициент эффективности, показывающий во сколько раз дисперсия разомкнутой системы при действии возмущения

больше дисперсии замкнутой системы: $k_{эф} = \frac{S_p^2}{S_z^2}$, S_p^2 , S_{zv}^2 – дисперсии регулируемой переменной для разомкнутой и замкнутой систем.

В таблице 1 сведены показатели эффективности системы для различных транспортных запаздываний. Из графиков и таблицы 1 видно, что при уменьшении величины запаздывания с 4 до 1 происходит существенное увеличение эффективности работы регулятора (рис. 3). Это связано с тем, что при уменьшении транспортного запаздывания повышается быстродействие замкнутого контура системы и расширяется частотный диапазон эффективной работы системы управления.

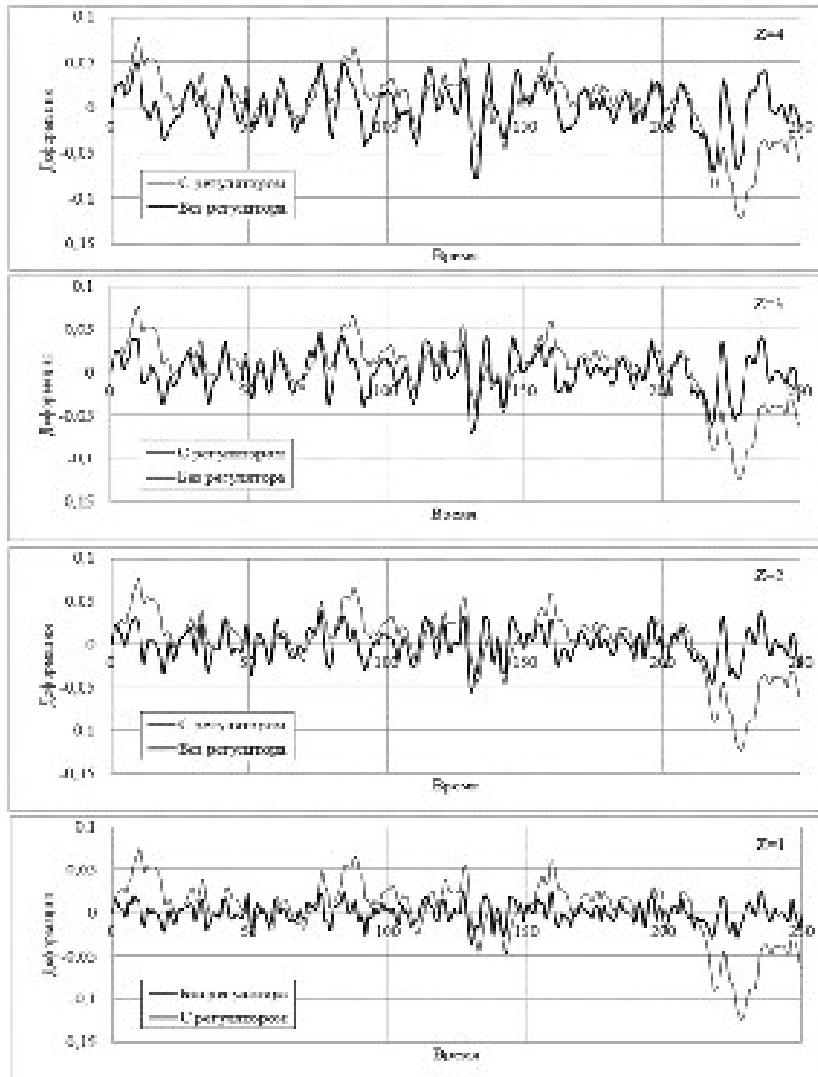


Рис. 2. Временные ряды выходного сигнала при замкнутой и разомкнутой системе для разных запаздываний

Таблица 1

Значения дисперсий и коэффициента эффективности при разомкнутой и замкнутой системах

Z	s_0^2	s_y^2	$k_{эфф}$
1	0,0013	0,00013	10,02
2	0,0013	0,00031	4,23
3	0,0013	0,00047	2,84
4	0,0013	0,00059	2,25

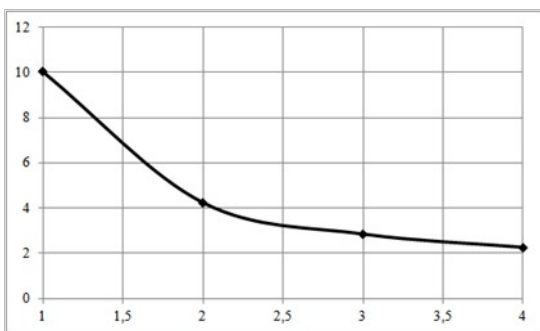


Рис. 3. Падение коэффициента эффективности при увеличении Z

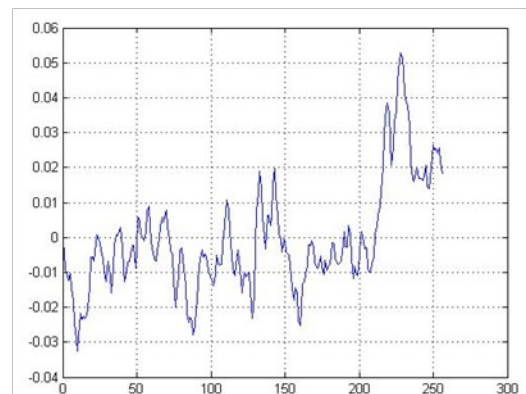


Рис. 4. Диапазон изменения управляющего воздействия

Полученный диапазон изменения управляющих воздействий по положению резца по поперечной оси (рис. 4) является допустимым для технологического процесса и показывает правильность выбора матриц R_1 , R_2 .

Выводы.

1. На основе методики построения стохастического линейно-квадратичного регулятора создан пятиканальный регулятор, который с учетом дальнейшей интерполяции управляющих воздействий позволяет управлять профилем вала по всей его длине.

2. Методом компьютерного моделирования показана эффективность разработанной системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Квакернак Х. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернак, Р. Сиван. М.: Мир. 1977. 654с.
2. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / В. Стрейц. М.: Наука, 1985. 294 с.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: т.3. Синтез регуляторов систем управления / Под ред. К.А. Пупкова, М. Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с.
4. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB / Ю. Лазарев. СПб.: Питер, Изд. Группа BHV, 2005. 512 с.
5. Перемутьер В.М. Пакеты расширения Matlab. Control System Toolbox и Robust Control Toolbox / В.М.Перемутьер. М.: САЛОН-ПРЕСС, 2008. 224с.
6. Медведев В.С. Control System Toolbox / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. М.: Диалог МИФИ, 1999. 287с.

Набилкин Артем Юрьевич –

аспирант кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета)

Artyom Y. Nabilkin –

Postgraduate of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management» (branch of Saratov State Technical University)

Кравченко Станислав Алексеевич –

аспирант кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета)

Stanislav A. Kravchenko –

Postgraduate of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management (branch of Saratov State Technical University)

Бирюков Владимир Петрович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета)

Vladimir P. Biryukov –

Dr. Sc., professor of department «Technology and Automation of Machine Building» of Balakovo Institute of Technique, technology and management (branch of Saratov State Technical University)

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ВОЛНОВОГО НАСОСА.

Разработаны конструкции исполнительного механизма, а именно магнитожидкостного устройства (МЖУ), для гидравлического волнового насоса. Проведены эксперименты для сухой и мокрой камеры. По итогам экспериментов были получены статические характеристики.

Магнитожидкостное устройство, волновой насос

Y.V.Nikolaenko, A.V.Vlasov

RESEARCH MAGNITZHIDKOSTNOGO WAVE PUMP

Of the design of the actuator, namely OLS, the hydraulic pump wave. Experiments were conducted for dry and wet chamber. According to the results of experiments were obtained static characteristics.

the hydraulic pump

В результате проделанных исследований было разработано две конструкции исполнительного механизма, а именно МЖУ, для гидравлического волнового насоса.

Первая конструкция основывается на МЖУ под названием «коровий язык» и представляет из себя упругую оболочку наполненную модельной магнитной жидкостью, или ее эквивалентами.

Данный вариант имеет ряд недостатков, таких как, невозможное равномерное распределение эквивалента магнитной жидкости внутри упругой оболочки, за счет действующей на нее силы тяжести. Имея в качестве передвигающегося элемента постоянный ферритовый магнит, внутри которого магнитное поле равномерно, добиться нужного результата не удастся.

Решением данной проблемы мог бы стать неодимовый магнит с радиальной намагниченностью. Данный магнит должен представлять из себя кольцо конусоидальной формы, верхняя грань которого несколько заужена по сравнению с нижней. Это конструктивное исполнение магнита позволит считать магнитное поле внутри кольца не равномерным, а смещенным к верхней части. При этих условиях возможно добиться равномерного распределения эквивалента магнитной жидкости внутри упругой оболочки [2].

Неодимовый магнит так же обладает значительно большей силой магнитного поля, позволяющая наиболее плотно прижать упругую оболочку к станкам трубки, за счет чего снизить возможность просачивания. Невозможностью использования данного магнита для создания МЖС сенсора первого конструктивного варианта, является очень высокая цена, порядка 30000 рублей.

Наряду с первой конструкцией МЖС была разработана вторая, представляющая из себя поршень, выполненный в виде двух дисков соединенных между собой сердечником. Материал изготовления пластик. Полость находящаяся внутри поршня заполняется магнитной жидкостью [1]. Сверху вся конструкция покрывается упругой оболочкой, препятствующая смешиванию и выливанию магнитной жидкости с рабочей. Преимуществом второй конструкции является возможность равномерного распределения магнитной жидкости, за счет того, что она заполняет все пространство предоставленное ей. В результате выбора второго конструктивного исполнения МЖУ был разработан стенд, являющийся гидравлическим насосом, внешний вид которого представлен на рис. 1.

Стенд разделен на две части, первая из которых является непосредственно самим насосом, а вторая состоит из элементов привода. Гидравлическая часть состоит из: двух пла-

стиковых бутылок для залива и выливания воды; кран с тремя положениями; тройник металлический; шланги резиновые; шприц пластиковый; поршень с магнитной жидкостью; заглушка с отверстием; постоянный магнит с креплением под ролики. Все элементы гидравлической части установлены и закреплены на деревянную панель с ножками.



Рис.1. Внешний вид стенда

Принцип действия насоса схематически показан на рис. 2, 3.

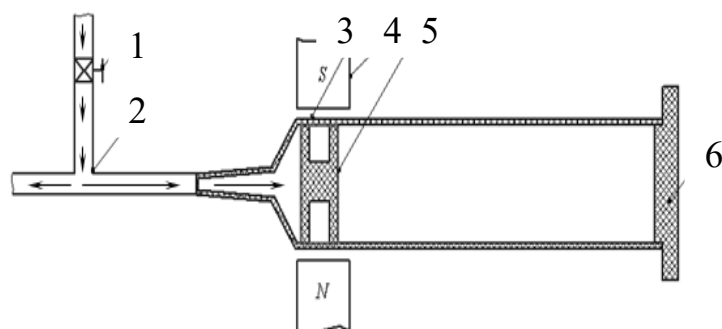


Рис.2. Схема гидравлического насоса при заливке воды
1 – кран; 2 – шланг; 3 – корпус; 4 – магнит; 5 – поршень; 6 – заглушка

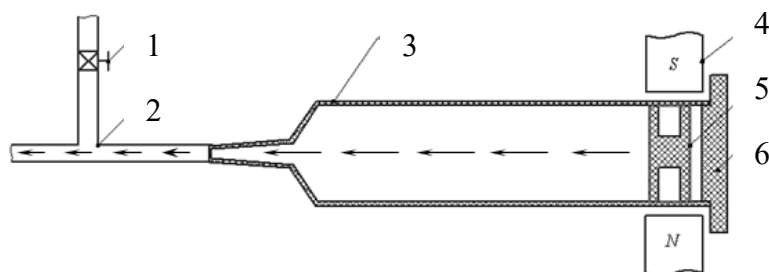


Рис.3. Схема гидравлического насоса при выливании воды
1 – кран; 2 – шланг; 3 – корпус; 4 – магнит; 5 – поршень; 6 – заглушка

Первоначальное состояние поршня крайнее левое положение представлено на рис. 2. При открытом положении крана 1 вода поступает внутрь шланга 2 и корпуса 3, направление движение воды указано стрелками. При этом магнит 4 начинает двигаться вправо, поршень под действием магнитного поля движется в том же направлении. Это продолжается до тех пор, пока поршень 5 не достигнет крайнего правого положения, вода за это время заполняет весь предоставленный ей объем.

При обратном движении привода магнит начинает двигаться в другую сторону (рис. 3), кран переводится в положение, при котором залив воды невозможен, но при этом открытом остается лишь специальное отверстие, для травления воздуха.

Поршень под действием магнитного поля, начинает двигаться за магнитом, тем самым, вытесняя воду. Вода выливается в специальный резервуар. Дойдя до крайнего правого положения, цикл повторяется заново.

Для нахождения наилучших показаний при использовании гидравлического насоса на основе МЖУ, необходимо провести ряд экспериментов для того чтобы прийти к оптималь-

ному поршню. В этой связи было выбрано пять возможных варианта исполнения МЖУ. Каждый из которых имеет различные характеристики. Первым и самым простым является использование оболочки с самодельной магнитной жидкостью.

Данный вариант необходимо проверить, для того чтобы узнать, возможно ли равноценная замена модельной магнитной жидкости, самодельной. Вторым вариантом изготовления поршня стали металлические опилки в силиконе. Третьим случаем является модельная магнитная жидкость Т-40. Преимуществом использования является отсутствие оседания частиц, и равномерная намагниченность. Четвертый вариант - использование магнитной стружки. Отрицательной стороной данного варианта является то, что очень сложно добиться с помощью поверхностно-активных веществ, условия при котором частицы магнита не слипались между собой. Пятый, металлические шарики, обладают самым большим усилием на отрыв, но из-за крупного размера, $0,5 \div 2$ мм, образуются много пустот.

Так же очень важным является нахождения пропорций между составными частями эквивалентов. Общий объем поршня составляет 9 мл. Примем это значение за 100%.

Для случая, когда используется стружка и силикон наилучшими значениями являются: стружка 80%; силикон 20%. Металлические шарики диаметром от 0,5 до 2 мм. Пропорции составляют: шарики 70%; силикон 30%. При использовании магнитной пыли, были выбраны следующие пропорции: магнитная пыль 80%; силикон 20%. Модельная магнитная жидкость и самодельная занимают 100% объема поршня.

На рис.4 представлен сводный график статических характеристик эквивалентов магнитной жидкости.

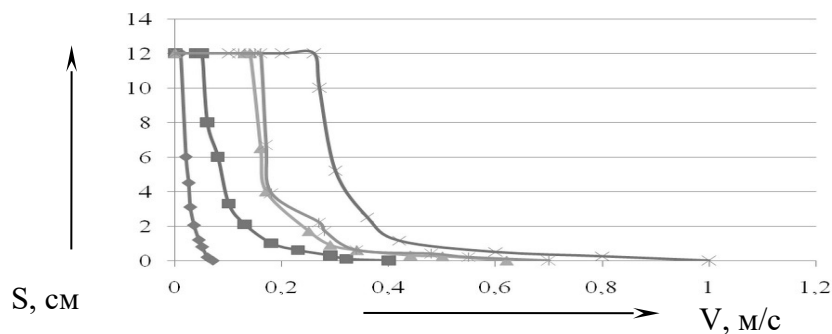


Рис.4. Сводный график статических характеристик эквивалентов магнитной жидкости

- 1 — экспериментальная магнитная жидкость, 2 — магнитная пыль с силиконом,
 3 — металлическая стружка с силиконом, 4 — магнитная жидкость Т-40,
 5 — металлические шарики с силиконом

Из вышеперечисленных статических характеристик, самые лучшие показал эквивалент магнитной жидкости, выполненный в виде металлических шариков с силиконом.

Так как данный эквивалент имеет наиболее большую скорость, при которой магнитное поле способно удерживать МЖУ.

Статические характеристики МЖУ (мокрая камера).

Статические характеристики эквивалентов МЖУ так же как и в предыдущем случае отображаются с помощью графиков.

Определяют зависимость перемещения МЖУ под действием магнитного поля, при изменении постоянной скорости.

Применение мокрой камеры позволит определить, возможно ли использование данных МЖУ эквивалентов в гидравлическом насосе, для вытеснения воды.

На рис.5 представлен общий график статических характеристик эквивалентов магнитной жидкости (мокрая камера).

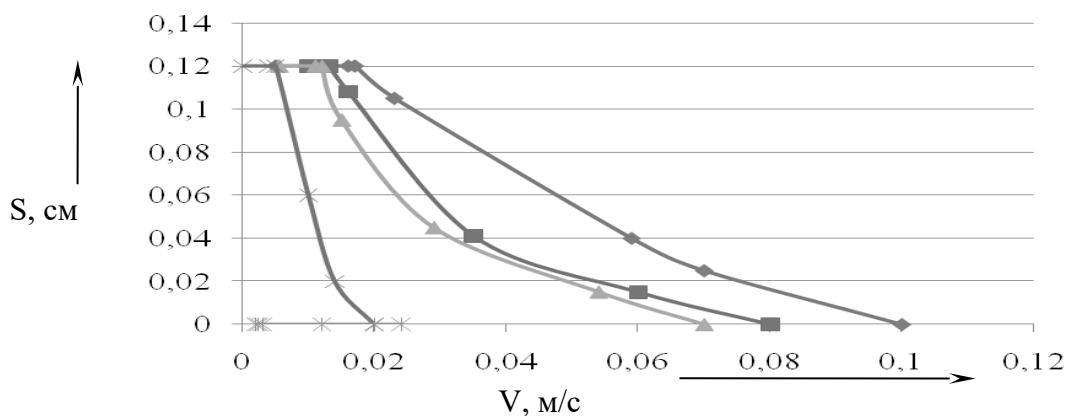


Рис.5. Общий график статических характеристик эквивалентов магнитной жидкости (мокрая камера)
 1 - * экспериментальная магнитная жидкость; 2 - x магнитная пыль с силиконом; 3 - ▲ металлическая стружка с силиконом; 4 - ■ модельная магнитная жидкость Т-40; 5 - ◆ металлические шарики с силиконом

Исходя из полученных результатов эксперимента, а именно определения намагниченности эквивалентов магнитной жидкости, а так же статических характеристик получили, что наиболее подходящим сенсором является сенсор на основе модельной магнитной жидкости Т-40 и С2-40. Это связано с тем, что они обладают наибольшей намагниченностью по сравнению с другими приведенными эквивалентами.

С учетом низкой скорости движения постоянного магнита 0.004 м/с возможно использование остальных эквивалентов магнитной жидкости, за исключением самодельной магнитной жидкости, показавшей недостаточные характеристики.

МЖУ наполненный магнитной пылью и силиконом показал наиболее высокие динамические характеристики.

Для улучшения показателей разработанного гидравлического насоса рекомендуется заменить постоянный ферритовый магнит, на неодимовый, поскольку он обладает более сильной напряженностью магнитного поля. Также возможна замена постоянного магнита на электромагнитные катушки, что позволит упростить конструкцию насоса, убрав из нее привод для движения постоянного магнита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов А.В. Постановка задачи разработки электрогидравлического пульсатора для аппарата / А.В.Власов, Ю.В.Николаенко // Искусственное сердце: сб.ст. Междунар. конф. Пенза: ПДЗ. 2008. С.56-60.
2. Шумаков В.И. Искусственное сердце и вспомогательное кровообращение / В.И.-Шумаков, В.Е.Толпекин, Д.В.Шумаков. М.: Янус-К, 2003. 376 с.

НИКОЛАЕНКО Юлия Викторовна – ассистент кафедры «Управление и информатика в технических системах» БИТТУ Саратовского государственного технического университета

NIKOLAYENKO Julia – Assistant. Univ. «Management and Information Science in Engineering Systems» Beatty SSTU them

Власов Андрей Вячеславович – кандидат технических наук, докторант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

Vlasov Andrey V. – Ph.D., Associate Professor of «Automation and process control» Saratov State Technical University

УДК 681.5

И.А. Рожков, В.А. Ивашенко, А.А. Игнатьев**МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В ДЕТАЛЯХ ПОДШИПНИКОВ**

Предложена методика, обеспечивающая распознавание дефектов в деталях подшипников в режиме реального времени. Разработано программное обеспечение по ее реализации и пользовательский интерфейс работы с ним. Проведен сравнительный анализ эффективности предложенной методики распознавание дефектов в деталях подшипников с существующими алгоритмами распознавания.

Подшипники, дефекты, качество поверхностного слоя деталей подшипников, искусственные нейронные сети

I.A. Rozhkov, V.A. Ivaschenko A.A. Ignatiev**TECHNIQUE RECOGNITION OF DEFECTS IN BEARINGS DETAILS**

The technique providing recognition of defects in bearings details in real time is offered. The software on its implementations and the user interface of operation with it are developed. The comparative analysis of efficiency of the offered technique recognition of defects in bearings details with existing algorithms of recognition is carried out.

Bearings, defects, quality of a blanket of bearings details, artificial neural networks

Введение

Важной задачей при производстве подшипников является контроль качества обработки их деталей в процессе шлифования. Необнаруженные на этой стадии дефекты деталей подшипников переходят в конечный продукт, поставляемый потребителям.

Наиболее эффективным при этом является вихретоковый контроль [1]. Сканограммы, полученные при данном контроле, наиболее точно отражают состояние поверхностного слоя деталей на глубину 25-50 мкм, что обеспечивает возможность построения эффективных систем распознавания дефектов.

В данной статье предлагается основанная на вихретоковом контроле методика, обеспечивающая распознавание дефектов в поверхностном слое деталей подшипников в режиме реального времени.

1. Методика распознавания дефектов деталей подшипников

В основу предлагаемой методики положен алгоритм обнаружения характерных для дефектов областей нестационарности сигнала, полученного с вихретокового датчика [2], и алгоритм идентификации их характеристик, в основу построения которого положен алгоритм заливки линиями (АЗЛ) областей, ограниченных контуром [3].

Предлагаемая методика содержит три этапа.

Этап 1. Реализация процедуры выявления нестационарных участков сигнала на сканограммах. Для этого изображение на сканограмме представляется в виде двумерного массива пикселей размерностью $n \times m$. Для каждого элемента матрицы вычисляется отклонение сигнала от среднего значения по всему изображению

$$\sigma_{ij} = \sqrt{(\bar{F} - F_{ij})^2}, \quad \bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m F_{ij}}{n \cdot m},$$

где $F_{i,j}$ – значение уровня сигнала в точке с координатами (i, j) .

Если отклонение в рассматриваемой точке не превышает некоторый заданный порог (устанавливается на этапе настройки системы), то она удаляется с изображения (пиксель закрашивается белым цветом), в противном случае – она остаётся на изображении (нестационарная область сигнала). Результатом выполнения данной операции является выделение областей дефектов (рис. 1). Для анализа выделенных областей дефектов используется АЗЛ. Применение АЗЛ позволяет определить характеристики выделенной области: периметр, линейные размеры, площадь и установить границы (координаты) области.

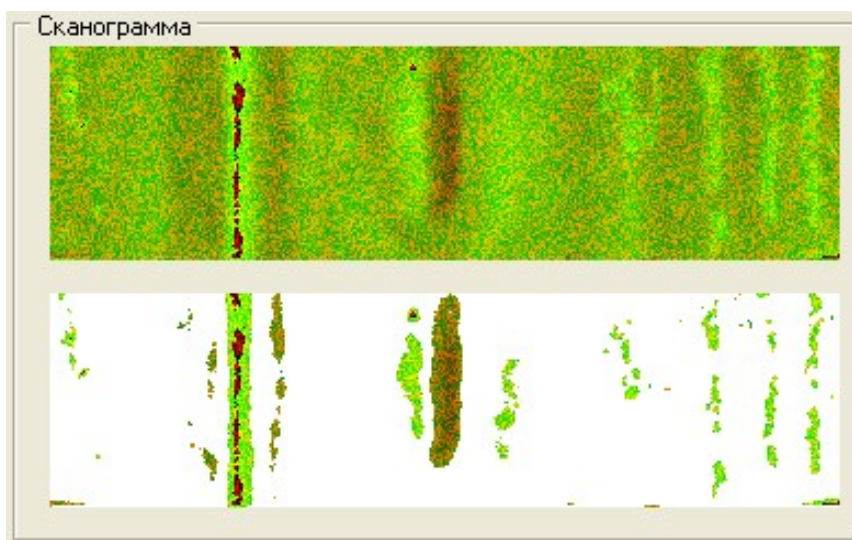


Рис. 1. Выделение нестационарных участков сигнала

Этап 2. Расчёт признаков, на основе которых осуществляется распознавание дефектов. В качестве признаков распознавания используются [4]:

- средний уровень сигнала, соответствующий области дефекта K_0 ;
- коэффициент заполнения области дефекта $K_1 = S_0 / S_p$, где S_0 – площадь области дефекта, а S_p – площадь прямоугольника, ограничивающего область дефекта;
- отношение периметра ограничивающего прямоугольника к периметру области дефекта $K_2 = P_0 / P_p$, где P_p – периметр ограничивающего прямоугольника, а P_0 – периметр области дефекта;
- отношение периметра окружности с площадью S_0 к периметру области дефекта $K_3 = 4\pi \cdot S_0 / P_0^2$;
- отношение сторон ограничивающего прямоугольника $K_4 = a/b$, где a – ширина и b – высота прямоугольника.

В качестве площади S_0 выступает общее количество точек (элементов матрицы пикселей) N , соответствующих рассматриваемой области дефекта. За периметр области дефекта P_0 принимается количество граничных точек области N_{cp} . Точка считается граничной, если хотя бы одна из четырёх соседних точек (пиксель) белого цвета.

Средний уровень сигнала, соответствующий дефектной области определяется по соотношению

$$K_0 = \frac{\sum_{i=1}^N F_i}{N},$$

где F_i – значение уровня сигнала в i -й точке области дефекта.

Параметры ограничивающего дефектную область прямоугольника рассчитываются по формулам:

$$a = i_{\max} - i_{\min}, \quad b = j_{\max} - j_{\min}.$$

Для вычисления K_0, K_1, K_2, K_3, K_4 на основе АЗЛ разработан алгоритм, который состоит из следующих шагов:

1. Определение начальной точки (i, j) области дефекта, которая находится путем перебора всех точек изображения: если очередная проверяемая точка (x, y) содержит нестационарный сигнал (небелого цвета и не была обработана ранее), то $i = x, j = y$ и выполняется переход к пункту 2. Иначе – проверяется следующая точка изображения. Если уже все точки изображения проверены, то алгоритм закончен.

2. Нахождение левой границы области дефекта по текущей координате i : если очередная проверяемая точка (i, j) не содержит нестационарный сигнал (пиксель белого цвета), то она граничная (рис 2а).

3. Пока не достигнута правая граница области (проверяемая точка (i, j) не белого цвета) выполняются следующие действия:

3.1. Пересчет характеристик области дефекта:

- увеличивается площадь дефектной области на 1: $S = S + 1$;
- увеличивается суммарный сигнал по области: $F_{\text{сум}} = F_{\text{сум}} + F_{i,j}$
- если точка $F_{i,j}$ граничная, то увеличивается периметр дефектной области на 1: $P = P + 1$;
- если $i < i_{\min}$, то $i_{\min} = i$;
- если $i > i_{\max}$, то $i_{\max} = i$;
- если $j < j_{\min}$, то $j_{\min} = j$;
- если $j > j_{\max}$, то $j_{\max} = j$.

3.2. Проверка принадлежности точки $(i, j-1)$ ещё не обнаруженной линии: если да, то координаты данной точки помещаются в стек (на рис. 2 точки, помещённые в стек помечены номерами).

3.3. Проверка принадлежности точки $(i, j+1)$ ещё не обнаруженной линии: если да, то координаты данной точки помещаются в стек.

3.4. Установка в точке (i, j) признака того, что она обработана.

3.5. Переход к следующей точке $(i+1, j)$: $i = i + 1$.

4. Если стек не пуст, то последними значениями координат из стека инициализируется точка новой линии ($i = i_{\text{стек}}, j = j_{\text{стек}}$) и выполняется переход к пункту 2., иначе – все точки данной области обработаны.

5. Производится расчёт характеристик K_0, K_1, K_2, K_3, K_4 обработанной области дефекта. Выполняется переход к пункту 1.

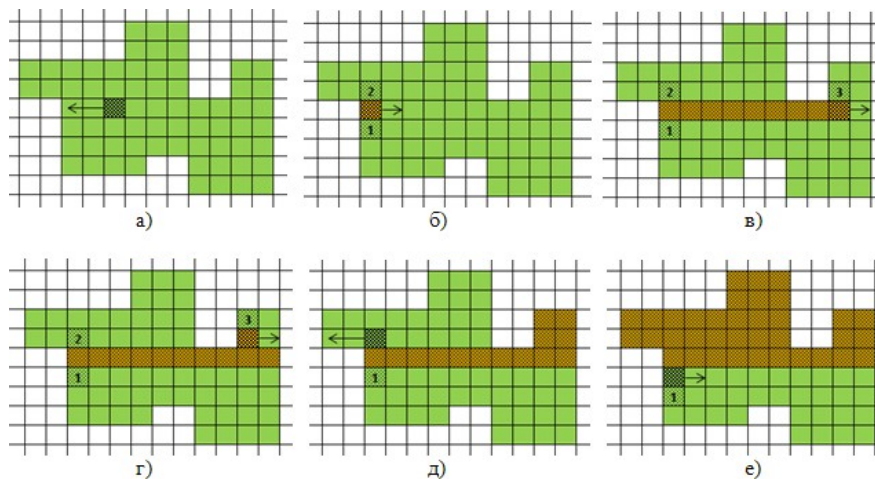


Рис. 2. Этапы работы алгоритма по расчёту характеристик областей дефектов

Этап 3. Распознавание дефектов на основе вычисленных характеристик областей дефектов с помощью искусственной нейронной сети (ИНС), представляющей собой четырёх-слойный персептрон: один входной слой (слой 1), два скрытых слоя (слои 2 и 3) и один – выходной (слой 4). Добавление двух внутренних слоёв позволило существенно повысить качество распознавания и снизить количество итераций обучения. Количество нейронов в 1–3 слоях соответствует числу входных признаков, а в выходном слое – числу распознаваемых дефектов (по одному нейрону на дефект).

2. Сравнительный анализ эффективности предлагаемой методики с существующими подходами по распознаванию дефектов

Отличительной особенностью предлагаемой методики является вычисление характеристик областей дефектов на основе АЗЛ, что позволило существенно ускорить распознавание дефектов.

Для анализа эффективности предложенной методики разработано программное обеспечение (ПО), пользовательский интерфейс которого представлен на рис. 3. Данное ПО позволяет обнаружить в исходных массивах сигнала, полученного с вихретокового датчика, области с нестационарным сигналом и определять их характеристики; отобразить уровень заполнения буфера стека на каждом шаге работы, среднее время обработки одного файла и количество итераций исследуемых алгоритмов (рис. 4). С помощью данного ПО обработаны файлы, полученные с прибора вихретокового контроля ПВК-К2М, различными методами: предложенным методом и методом на основе стандартного алгоритма заливки (САЗ) заливки замкнутых контуров [2]. Результаты сравнения представлены в таблице.

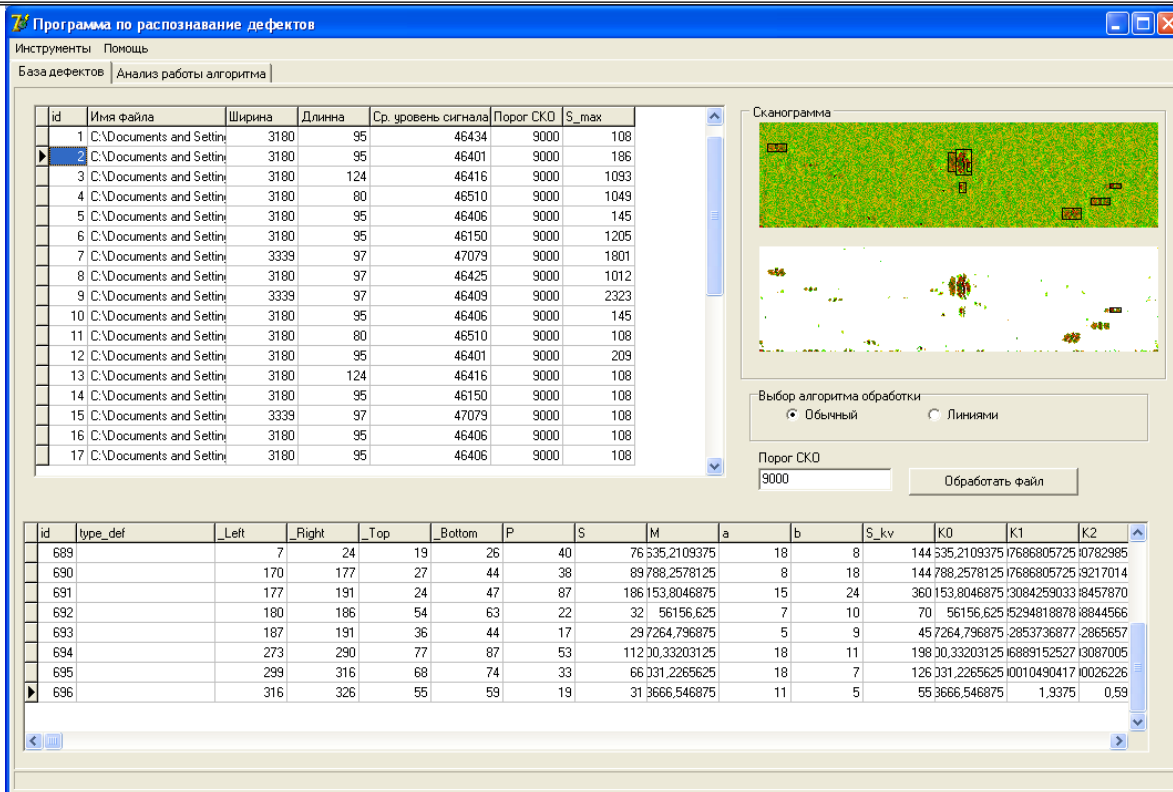


Рис. 3. Пользовательский интерфейс

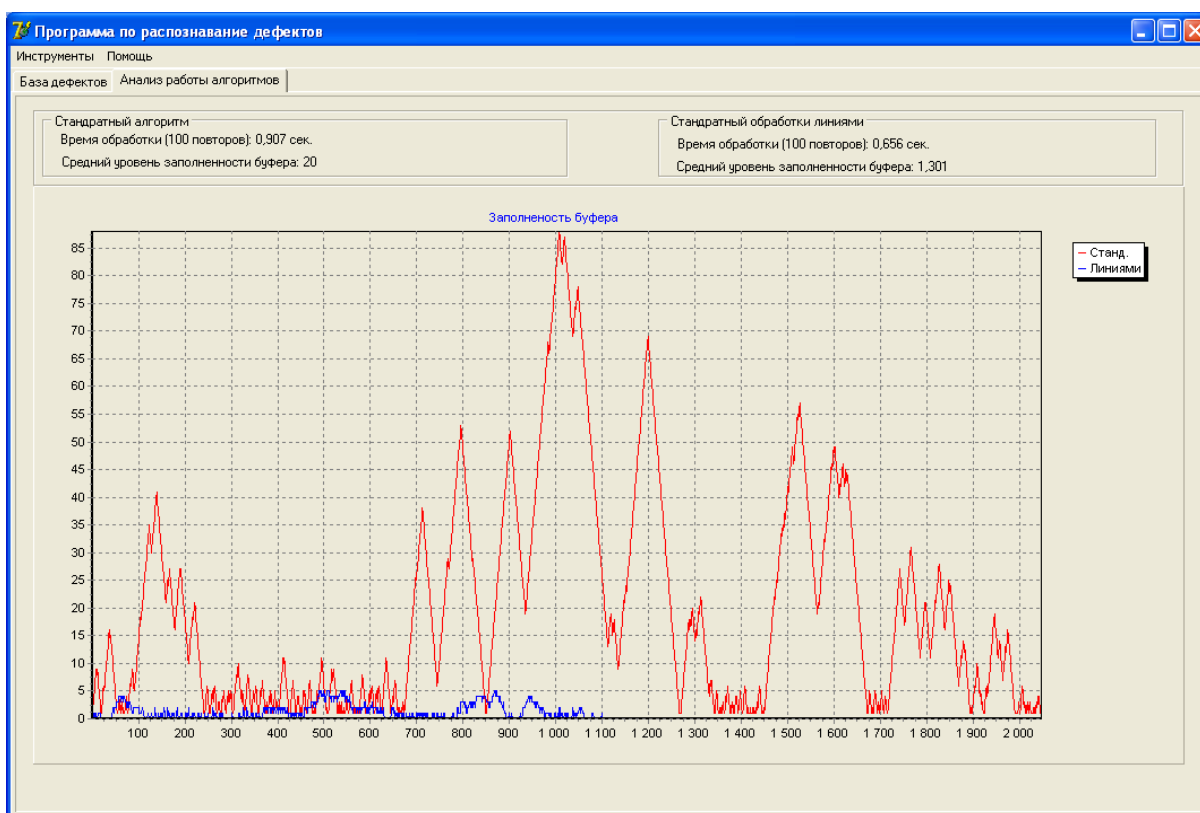


Рис. 4. Анализ работы исследованных алгоритмов
 Результаты работы алгоритмов обработки сканограмм деталей подшипников

Номер файла	Среднее время обработки файла (мс)		Средний уровень наполнения буфера стека		Кол-во итераций	
	САЗ	АЗЛ	САЗ	АЗЛ	САЗ	АЗЛ

2	3,1	2,4	20	1,3	2500	1100
7	35,4	19,5	393	2	24500	12500
8	11,8	6,9	211	1,1	8000	4000

Как видно предложенная методика позволяет в 1,5-2 раза быстрее вычислять параметры нестационарных участков сигналов и с существенно меньшими затратами (в 10-100 раз) памяти на стек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В.Г. Герасимов, В.В. Клюев, В.Е. Шатерников. М.: Энергия, 1983. 217 с.
2. Игнатьев А.А. Автоматизация распознавания дефектов шлифованных деталей в системе мониторинга технологического процесса производства подшипников / А.А. Игнатьев, А.Р. Бахтеев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. №3 (14). Вып.1. С. 136-142.
3. Иванов А. Алгоритмы заливки изображений / Обработка изображений (<http://habrahabr.ru/post/116374/>).
4. Рожков И.А. Идентификация дефектов поверхностного слоя деталей подшипников с помощью искусственной нейронной сети / И.А. Рожков, В.А. Иващенко // Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Саратов. 2010. Т. 1. С. 72-74.

Рожков Игорь Александрович – аспирант кафедры «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

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

Rozhkov Igor Alexandrovich – the post-graduate student of chair «Automation and management of technological processes» the Saratov State Technical University

Ivaschenko Vladimir Andreevich – dr.sci.tech., the leading scientific employee, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, s. Saratov

Ignatyev Alexander Anatolevich – Dr.Sci.Tech., the professor, Managing chair «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 004.891

Е.М. Самойлова, А.А. Игнатьев

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ SCADA-СИСТЕМЫ

В статье описывается интеллектуализация scada-систем.

Интеллектуализация, scada-система, экспертная система, автоматизированное управление, база знаний, АСУ ТП

E.M. Samoylova, A.A. Ignatev

**INTELLECTUALIZATION DESIGN AND MONITORING PROCESS
BASED ON THE USE OF SCADA-SYSTEM***The paper describes the intellectualization scada-systems.*

Intellectualization, scada-system, expert system, automated management, knowledge base, process control systems

В настоящее время тематика искусственного интеллекта охватывает огромный перечень научных направлений, начиная с таких задач общего характера, как обучение и восприятие (программы решения интеллектуальных задач и системы, основанные на знаниях), заканчивая специальными задачами (нейроподобные структуры, интеллектуальное программирование и интеллектуальные системы) [1].

При решении современных задач управления сложными многопараметрическими и сильносвязанными системами, объектами, производственными и технологическими процессами приходится сталкиваться с решением неформализуемых либо трудноформализуемых задач, поэтому всем новейшим информационно-управляющим системам должно быть присуще свойство интеллектуальности.

В настоящее время одним из направлений и весьма эффективной технологией автоматизированного управления динамическими системами во многих отраслях промышленности являются системы класса SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition, диспетчерское управление и сбор данных) [2, 3].

Например, рассмотрим SCADA-систему TRACE MODE 6. Этот программный комплекс содержит рекордное количество библиотек ресурсов, готовых к использованию в прикладных проектах, имеет встроенные бесплатные драйверы к более чем 1600 контроллерам и платам ввода/вывода, свыше 600 анимационных объектов, более 150 алгоритмов обработки данных и управления, комплексные технологические объекты. Режим автопостроения, применяемый в TRACE MODE 6, мгновенно формирует базу тегов для операторских станций, контроллеров и OPC серверов, настраивает сетевые связи, строит систему документирования и графический интерфейс.

Преимущества SCADA-системы TRACE MODE 6 как системы диспетчеризации:

- графическое, наглядное отображение информации;
- круглосуточный контроль технологических процессов;
- снижение влияния человеческого фактора;
- снижение эксплуатационных расходов;
- быстрая и достоверная диагностика состояния объектов;
- контекстные подсказки оператору в аварийных ситуациях;
- авторизованный доступ к информации и управлению;
- ведение журнала событий в автоматическом режиме;
- документальное определение причин аварий, потерь, и их виновников.

SCADA-система является графической инструментальной системой для проектировщиков АСУ ТП и инженерных служб автоматизации предприятий. Технология [интегрированной разработки АСУТП](#) единым инструментом, объединяющая как программирование операторского интерфейса (SCADA/HMI), так и промышленных контроллеров (SOFTLOGIC) позволяет пользователям TRACE MODE исключить ненужное дублирование инструментов, баз данных контроллеров и операторских станций и тем самым снизить стои-

мость проекта, число ошибок проектирования, увеличить производительность труда, масштабируемость и производительность АСУТП.

Основной частью ее применения является разработка верхнего уровня систем промышленной автоматизации. Созданные проекты состоят из набора файлов, описывающих используемые сигналы, промежуточные переменные, структуру математической обработки данных, документирования и архивирования, а так же файлы, содержащие графические формы представления информации управления, шаблоны генерируемых отчетов, файлы технологических и аварийных сообщений и пр.

Система содержит набор программных средств, позволяющих разрабатывать и отлаживать системы управления не прибегая к использованию языков программирования.

Система ориентирована на стандартные, надежные аппаратно-программные средства, а, следовательно, создаваемые с её помощью разработки имеют не высокую стоимость. Данное качество является большим плюсом.

Система допускает плавное обновление программных и аппаратных средств.

Операторские станции, разработанные с помощью TRACE MODE, отличаются многообразием эргономических решений, обусловленных богатством графических форм отображения информации. Одна и та же величина может быть представлена 200-ми видами.

Операторские станции, созданные на базе TRACE MODE, можно объединять в локальную сеть и создавать многоканальные системы телеуправления. В рамках пакета можно создавать сетевые комплексы, включающие до 200 сетевых узлов.

Система обеспечивает обработку информации от 64000 каналов ввода/вывода.

Следует отметить, что технология проектирования систем автоматизации на основе различных SCADA-систем во многом схожа и включает следующие этапы:

- Разработка архитектуры системы автоматизации в целом. На этом этапе определяется функциональное назначение каждого узла системы автоматизации.
- Решение вопросов, связанных с возможной поддержкой распределенной архитектуры, необходимостью введения узлов с горячим резервированием и т.п.
- Создание прикладной системы управления для каждого узла. На этом этапе специалист в области автоматизируемых процессов наполняет узлы архитектуры алгоритмами, совокупность которых позволяет решать задачи автоматизации.
- Приведение параметров прикладной системы в соответствие с информацией, которой обмениваются устройства нижнего уровня (например, ПЛК) с внешним миром (датчики температуры, давления и др.).
- Отладка созданной прикладной программы (включая реальный режим).

Известно, что проект системы управления – это совокупность всех математических и графических элементов системы, функционирующих на различных операторских станциях и контроллерах одной АСУ ТП, объединенных информационными связями и единой системой архивирования. Под проектом в TRACE MODE 6 понимается вся совокупность данных и алгоритмов функционирования распределенной АСУ (АСУТП и/или T-FACTORY), заданных средствами TRACE MODE.

Итогом разработки проекта является создание файлов, содержащих необходимую информацию об алгоритмах работы АСУ. Эти файлы затем размещаются на аппаратных средствах (компьютерах и контроллерах) и выполняются под управлением исполнительных модулей TRACE MODE [3, 4].

Технологические процессы, для которых традиционно применяют SCADA-системы, являются многопараметрическими и трудноформализуемыми, что часто отражается информационной перегрузкой оператора за счет генерации слишком большого количества событий и тревог, а то и их игнорированием.

Принимая во внимание то, что человек-диспетчер в условиях неопределенности и жесткого дефицита времени решает такие задачи, как:

- анализ проблемной ситуации;

- идентификация возникшего отклонения от нормального (штатного) режима функционирования объекта;
- поиск возможных корректирующих решений по воздействию на объект;
- прогнозирование ситуаций;
- оценка последствий принимаемых решений;
- выдача команд на отработку необходимых управляющих воздействий;

и учитывая международный опыт анализа большинства аварий в промышленности, энергетике и происшествий на транспорте, актуальной задачей при построении автоматизированных систем реального времени является перенос функций диспетчера по анализу данных, прогнозированию ситуаций и принятию соответствующих решений на компоненты интеллектуальных систем поддержки принятия и исполнения решений (на рис.1 это серый прямоугольник) [5].

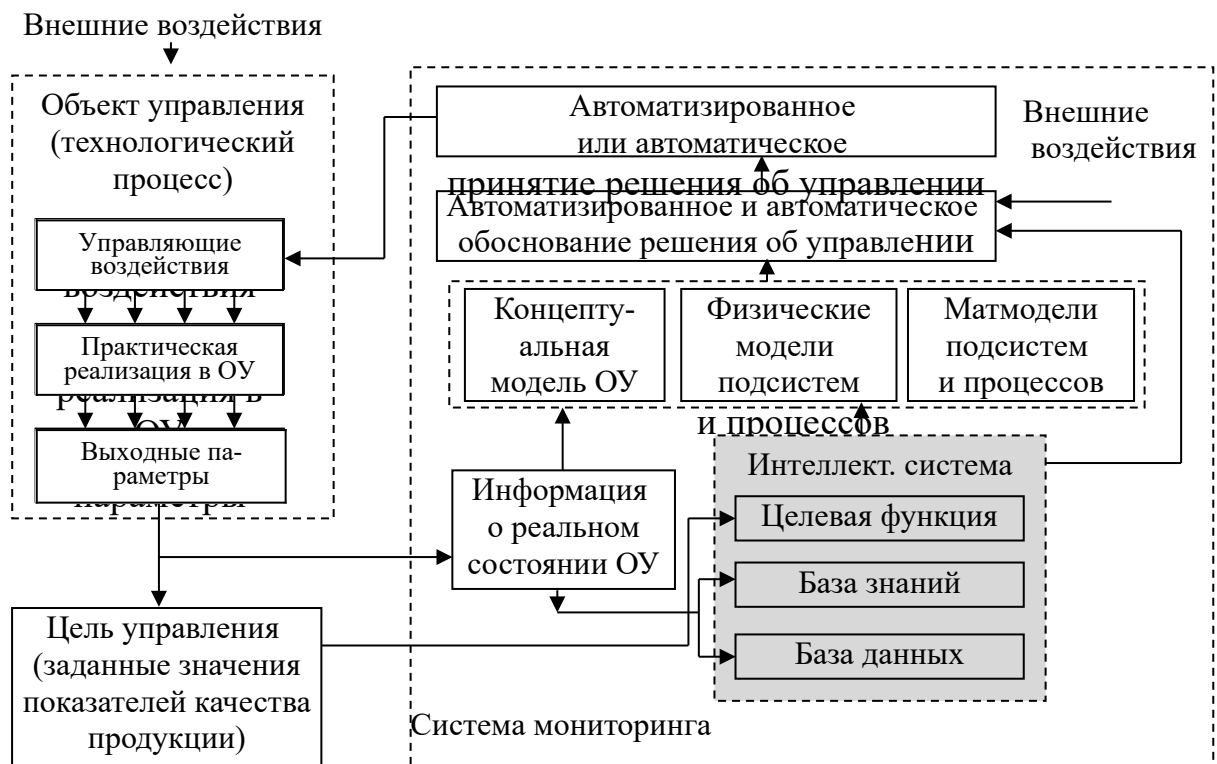


Рис. 1. Обобщенная модель интеллектуальной системы управления качеством продукции в реальном времени

Таким образом, функции интеллектуальных SCADA-систем должны включать в себя, помимо традиционных, ситуационный и логический анализ событий и состояний, прогноз поведения ТП во времени и оперативный поиск действий персонала при возникновении нештатных ситуаций.

В данном аспекте одним из наиболее перспективных направлений становится применение экспертных систем (ЭС), которые позволят, используя знания специалистов (*экспертов*) о некоторой конкретной узкоспециализированной предметной области, и в пределах этой области принимать решения на уровне *эксперта*-профессионала [5-7].

Любая экспертная система включает в себя основные блоки: подсистема логического вывода, которая использует информацию из базы знаний (БЗ), генерирует рекомендации по решению искомой задачи; модуль приобретения знаний и модуль отображения и объяснения решений (рис.1). А основными категориями решаемых ЭС задач являются: диагностика, управление (в том числе технологическими процессами), интерпретация, прогнозирование,

проектирование, отладка и ремонт, планирование, наблюдение (*мониторинг*), обучение. Одновременная работа со знаниями и большими объемами информации позволяет ЭС получать неординарные результаты и управлять в реальном времени сложным объектом или процессом, являясь одним из вариантов решения проблемы интеллектуализации управления и информационного обеспечения [5,6].

Таким образом, интеллектуализация традиционных SCADA-систем путем применения экспертных систем - один из главных путей развития средств искусственного интеллекта. Создание экспертной системы может значительно ускорить процесс проектирования сложной системы управления ТП, повысить качество решения задачи и дать экономию ресурсов за счет эффективного распределения функций центрального управления и локальных измерительных и управляющих подсистем. Такой эффект достигается за счет открытости системы представления знаний об объекте управления, адаптивности системы к условиям функционирования, автоматической коррекции управляющих воздействий при изменении существенных параметров в процессе функционирования.

В частности, внедрение многопараметрового активного контроля деталей подшипников на ОАО «Саратовский подшипниковый завод» [8] способствовало снижению в 2-3 раза значений отклонений от круглости и гранности поверхностей качения и на 60-80% средних квадратических отклонений значений указанных параметров, а также на 60% снизить брак по прижогам. Однако передача в систему мониторинга в реальном времени и накопление в базе данных огромного количества параметров точности заготовок и оценок динамического состояния станка для принятия решения по управлению качеством формообразования делает задачу трудноформализуемой и приводит к возникновению проблем информационной перегрузки, чего легко можно избежать внедрением интеллектуальной SCADA-системы.

Именно интеллектуальные технологии оказываются наиболее конструктивными и экономически оправданными при разработке современных систем автоматизированного проектирования и управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход / С. Рассел, П. Норвиг, 2-е изд.: Пер. с англ. М. Издательский дом «Вильямс», 2006. 1408 с.
2. Тарасов В. Б. Интеллектуальные SCADA-системы: истоки и перспективы / В.Б. Тарасов, М. Н. Святкина // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. №10.
3. Самойлова Е.М. Проектирование системы автоматизации на основе применения SCADA-системы / Е.М. Самойлова, А.Н. Колябин // Автоматизация и управления в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2011. С.196-201.
4. www.adastra.ru
5. Игнатъев А.А. Совершенствование управления качеством продукции на основе системы мониторинга с элементами искусственного интеллекта / А.А. Игнатъев, Е.М. Самойлова // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2009. № 3 (41). С. 207-209.
6. Самойлова Е.М. Интеграция искусственного интеллекта в автоматизированные системы управления и проектирование технологических процессов / Е.М. Самойлова, А.А. Игнатъев // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2010. № 2 (44). С. 117-119.
7. Lange T. Intelligent SCADA Systems // Engineer IT. Automation and Technical. Control April 2007. P. 26-30.
8. Игнатъев С.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции // С.А. Игнатъев, В.В. Горбунов, А.А. Игнатъев // Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 160 с

Самойлова Елена Михайловна – кандидат технических наук, доцент 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

Samoilova Elena Mikhailovna – Ph.D., Associate Professor of «Automation and process control» Saratov State Technical University

Ignatyev Alexander Anatolevich – Dr.Sci.Tech., the professor, Managing chair «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 531.73

Г.М. Садчикова, А.П. Мамолина

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЭППР ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТЫХ КАНАЛАХ

В представленной работе рассмотрены результаты экспериментальных исследований гидроэлектрического поляризованного преобразователя расхода (ГЭППР) жидкостей в открытых каналах, а так же приведена математическая модель, построенная на базе полного факторного эксперимента и отражающая зависимость тока на выходе ГЭППР от величины расхода.

Измерение расхода, открытые каналы, математическая модель, статическая характеристика

G.M. Sadchikova, A.P. Manolina

MATHEMATICAL MODEL HPCC OF THE CHARGE OF THE LIQUID APPLIED TO MEASUREMENT IN THE OPEN CHANNELS

In the presented work results of experimental researches of the hydroelectric polarizing converter of the charge (HPCC) liquids in the open channels and so the mathematical model constructed on the basis of full factorial experiment and reflecting dependence of output current HPCC from size of the charge is resulted are considered.

Measurement of the charge, the open channels, mathematical model, direct current characteristic

На объектах современных промышленных предприятий для управления технологическими процессами необходимо вести учет расхода воды, сточной жидкости, различных реагентов для их последующей обработки и т.д. Для этого используют преобразователи расхода (ПР) жидкостей в открытых (безнапорных) каналах, принцип действия которых основан на различных методах измерений и которые имеют различные метрологические и технические характеристики, условия монтажа и эксплуатации, а так же область применения.

Принцип действия разработанных гидроэлектрических поляризованных преобразо-

вателей расхода (ГЭППР) основан на зависимости величины тока поляризации, возникающего в измеряемой среде под воздействием электромагнитного поля от скорости прохождения среды через прибор [1]. Особенностью ГЭППР является низкое энергопотребление, отсутствие потерь давления при измерении, достаточно высокая точность (до 5% от измеряемой величины), простота монтажа и эксплуатации. Постоянная времени характеризующая быстродействие прибора составляет 2-5 мс. Это позволяет использовать прибор в современных системах управления.

Поляризационный расходомер (Рис. 1) содержит два электрода 1 прямоугольной формы, выполненные из оргстекла, фольгированные с одной стороны. Один из электродов соединен с источником питания. Напряжение между электродами (U) варьируется от 10 до 80 В. Со второго электрода снимаются показания тока. Электроды помещаются в жидкость, расход которой необходимо измерить (глубина погружения 30 – 40мм). В процессе проведения экспериментальных исследований электроды располагаются в различном положении (параллельно друг к другу, под углом), при этом расстояние между ними изменяется, а расход остается постоянным.

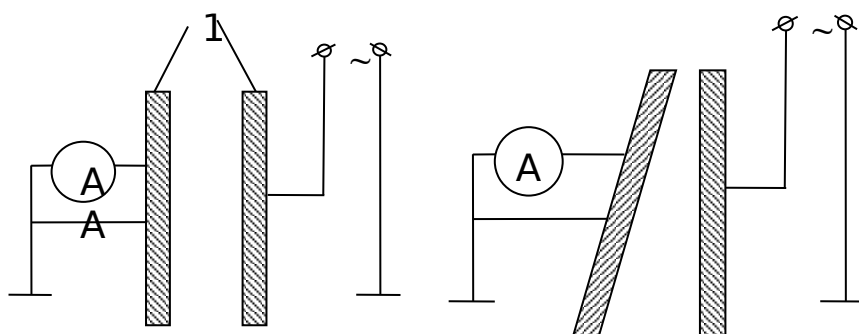


Рис. 1. а) плоскопараллельные электроды; б) электроды, расположенные под углом

Для составления плана экспериментальных исследований и получения численной математической модели проведены предварительные испытания. Крутизна статической характеристики определяется по формуле

$$\Delta = \frac{\Delta I}{Q} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где: ΔI – разность между величиной тока, измеренной при нулевом расходе и током при заданном расходе, мА; Q – расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с} \cdot 10^{-6}$.

1. Для плоскопараллельных электродов (рис. 2) результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 2

U, В	10	30	50	70
I_0 , мА	13.6	32	40	56.4
I_Q , мА	13.2	31,4	39.1	55
Δ , %	2,66	4	6	9,3

2. Для электродов, расположенных на расстоянии: $l_1=30 \text{ мм}$, $l_2=100 \text{ мм}$ (рис. 3) результаты экспериментов представлены в табл. 2

Таблица 2

U, В	10	20	30	60	70	80
I_0 , мА	2,16	6.8	11	22	26	36
I_Q , мА	2,06	6,3	10.5	21,2	24,9	34,8

$\Delta, \%$	0,6	3,3	3,3	5,3	7,3	8
--------------	-----	-----	-----	-----	-----	---

Из рассмотренных экспериментов видно, что большая крутизна (Δ) получена при расположении электродов под углом.

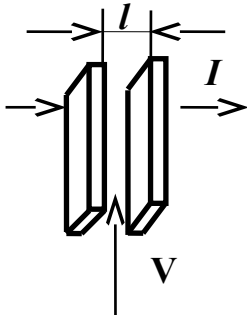


Рис. 2. Плоскопараллельные электроды

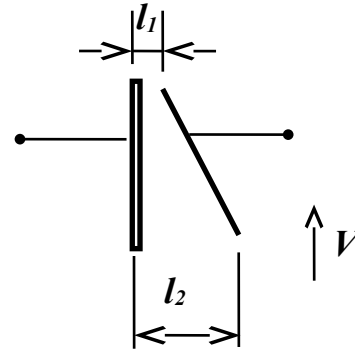


Рис. 3. Электроды, расположенные под углом

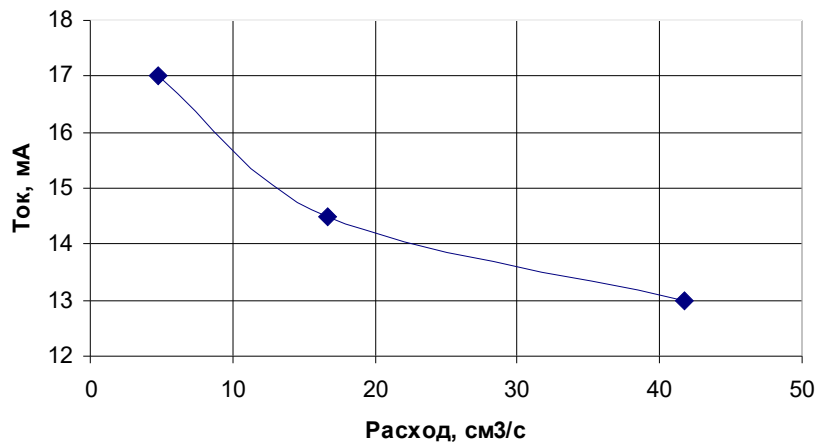


Рис. 4. Статическая характеристика

Для определения оптимальных параметров преобразователя расхода проведен полный факторный эксперимент, в котором в качестве факторов приняты следующие величины:

- x_1 – напряжение питания, подаваемое на рабочий электрод, В;
- x_2 – расстояние между электродами, мм;
- x_3 – угол между электродами.

Параметром оптимизации является крутизна статической характеристики, которая представляет собой отношение изменения полного тока к расходу воды.

Для исследуемого ГЭППР область определения факторов следующая: $x_1 - 10 \div 100$ В; $x_2 - 5 \div 120$ мм; $x_3 - 0^\circ \div 45^\circ$.

Составлена матрица планирования эксперимента. Результаты эксперимента представлены в табл. 3. Для каждого варианта проведено по четыре параллельных опыта, при этом изменялись следующие величины: U – напряжение питания, В; d – расстояние между электродами, мм; α° – угол между электродами; I_{\max} – ток, измеряемый при расходе воды $Q_0 = 0$ см³/с; I_{\min} – ток, измеряемый при расходе воды $Q_{\max} = 41.7$ см³/с.

Определим коэффициенты линейной модели (функция отклика):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3. \tag{2}$$

Коэффициенты определим по следующей формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} + y_j}{N}. \quad (3)$$

Таблица 3

Результаты экспериментов

№ опыта	U, В	d, мм	α°	I _{max} , мА				I _{min} , мА			
				1	2	3	4	1	2	3	4
1	80	120	0	27,8	26,2	27	26,4	22,2	21,5	22,9	22,4
2	10	120	0	13,6	13,3	12,8	13	12,1	12	11,9	12,1
3	10	5	0	16,4	16,2	16,1	16,1	15,2	15,1	15	15
4	80	5	0	36,8	36,1	36,5	36,3	33	33,2	33,4	33,1
5	80	120	45	37	36,8	36,6	37	34	33,5	33,6	33,7
6	10	120	45	6,2	6,9	6,5	6,5	4,7	4,6	4,6	4,4
7	80	5	45	33,2	33	33,1	32,9	28,6	29	27,9	28,5
8	10	5	45	15,1	14,8	15	15,2	14,1	14,3	14,2	14,3

Линейная модель имеет вид:

$$y = 0.175 + 0.035 \cdot x_1 - 0.0308 \cdot x_2 + 0.0318 \cdot x_3. \quad (4)$$

Анализ модели позволяет сделать следующие выводы:

- 1) так как коэффициент b_1 имеет наибольшее значение, то фактор x_1 (напряжение между электродами) более чем другие факторы влияет на параметр оптимизации;
- 2) коэффициенты b_1 и b_3 имеют знак плюс, следовательно с увеличением факторов x_1 (напряжение между электродами) и x_3 (угол между электродами) параметр оптимизации должен увеличиваться. Коэффициент b_2 имеет знак минус, значит фактор x_2 (расстояние между электродами) оказывает отрицательное влияние на параметр оптимизации;
- 3) данные выводы соответствуют физической природе эксперимента.

Результаты обработки экспериментальных данных следующие: однородность дисперсий определена с помощью критерия Фишера, полученная величина сравнивается с табличной величиной F-критерия.

$$\frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2} = \frac{0.62}{0.095} = 6.52. \quad (5)$$

Критерий Фишера, полученный расчетным путем меньше табличного значения, следовательно, можно сделать вывод - дисперсии однородны.

Дисперсия параметра оптимизации.

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{q=1}^n (y_{iq} - \bar{y}_i)^2}{N(n-1)} = \frac{0.0037}{24} = 0.000125, \quad (6)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$; $q = 1, 2, \dots, n$.

Дисперсия адекватности (S_{ay}^2):

$$S_{ay}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}{f} \cdot \frac{0.004}{4} = 0.001. \quad (7)$$

Для проверки адекватности модели используется F-критерий Фишера:

$$F = \frac{S_{ay}^2}{S_{(y)}^2}, \quad F = \frac{0.001}{0.000125} = 8. \quad (8)$$

Табличное значение F-критерия для $f_1 = 4$ и $f_2 = 3$ равно 9.1. Так как рассчитанное значение не превышает табличного, то модель можно считать адекватной.

Проверка значимости коэффициентов. Проверка значимости каждого коэффициента проводится независимо. Доверительный интервал b_j

$$\Delta b_j = \pm t \cdot S(b_j), \quad (9)$$

где: t – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы, с которыми определялось $S_{(y)}^2$, критерий Стьюдента равен 3.182; $S_{(bj)}$ – квадратичная ошибка коэффициента регрессии.

$$S_{(bj)} = +\sqrt{S_{(bj)}^2} = +\sqrt{0.0000157} = 0.0039, \quad (10)$$

$$\Delta b_j = \pm 3.182 \cdot 0.0039 = 0.012. \quad (11)$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала.

$$(b_0) = 0.061; (b_1) = 0.035; (b_2) = -0.0308; (b_3) = 0.0318. \quad (12)$$

Можно сделать вывод о том, что все коэффициенты значимы.

Выбран лучший опыт из предыдущей серии и проведен проверочный повторный эксперимент для построения статической характеристики. Данные повторного эксперимента (средние значения трех параллельных опытов) занесены в табл. 4.

Таблица 4

Экспериментальные данные

Q, см ³ /с	0	16.7	31.2	41.7
\bar{I} , mA	19.2	14.5	12.2	11.1

Крутизна статической характеристики равна:

$$Y = \frac{\Delta I}{\Delta Q} = \frac{19.2 - 11.1}{41.7 - 0} \cdot 100\% = 19\%. \quad (13)$$

Величина крутизны статической характеристики позволяет использовать ГЭППР в практических целях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов В.В., Садчикова Г.М. Устройство для измерения расхода. Патент № 2148798. Бюл. №13 от 10. 05. 2000.
2. Лобачев П.В. Измерение расхода жидкостей и газов в системах водоснабжения и канализации / П.В Лобачев. М.: Стройиздат, 1985. 220 с.
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества / П.П. Кремлевский. Л.: Машиностроение, 1989. 701 с.

Садчикова Галина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал) Саратовского государственного технического университета

Sadchikova Galina Mihajlovna – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of «Technology and automation of engineering industry» of Balakovo Institute of Techniques, Technology and Management (branch) of the Saratov State Technical University

Мамолина Анна Петровна –
аспирант кафедры «Технология
и автоматизация машиностроения»
Балаковского института техники,
технологии и управления (филиал)
Саратовского государственного
технического университета

Mamolina Anna Petrovna –
post-graduate student of the Department
of «Technology and automation of engineering
industry» of Balakovo Institute of Techniques,
Technology and Management (branch)
of the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 531.73

Г.М. Садчикова, А.П. Мамолина

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА В ОТКРЫТЫХ КАНАЛАХ

В работе рассмотрены теоретические основы построения гидроэлектрического поляризионного преобразователя расхода (ГЭППР) в открытых каналах. В качестве математической модели, учитывающей физические основы работы устройства применяется уравнение полного тока.

Ток поляризации, уравнение полного тока, система уравнений электрогидродинамики

G.M. Sadchikova, A.P. Manolina

THEORETICAL BASES OF DEVELOPMENT MATHEMATICAL MODELS HYDROELECTRIC ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО CONVERTER OF CONSUMPTION IN AN OPEN CHANNELS

In work theoretical bases of construction hydroelectric polarizing converter of the charge (HPCC) in open channels. As a mathematical model that takes into account the physical principles of the operation of the device is applied equation full current. Current polarization, the equation full current, the system of equations electro hydrodynamics.

Current to polarizations, equation of full current, system of equations an electric hydrodynamics

Принцип действия ГЭППР (гидроэлектрического поляризационного преобразователя расхода) основан на взаимодействии течений заряженных диэлектрических жидкостей с электрическими полями.

Основным, характерным для любого диэлектрика процессом, возникающим при воздействии на него электрического напряжения, является поляризация - ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул [1]. При изменении в пространстве положения частиц диэлектрика, имеющих заряд того или иного знака, каждый макроскопический объем диэлектрика приобретает некоторый наведенный (индуцированный) электрический момент, которым этот объем диэлектрика до воздействия электрического поля не обладал [2].

Различают два основных вида поляризации. К первому виду относится электронная и ионная поляризация, совершающаяся в диэлектрике под воздействием электрического поля практически мгновенно. Релаксационная поляризация, относящаяся ко второму виду, нарастает и убывает замедленно.

Способностью к дипольной поляризации, которая относится к числу релаксационных методов поляризации, обладают полярные диэлектрики.

Сущность дипольной поляризации сводится к повороту в направлении электрического поля молекул полярного диэлектрика [2]. В полярных диэлектриках даже при отсутствии электрического поля молекула представляет собой электрический диполь с отличным от нуля электрическим моментом:

$$\mu = q \cdot l, \quad (1)$$

где q – суммарный электрический заряд молекулы, Кл; l – плечо диполя, м.

Молекула воды имеет вид равнобедренного треугольника, и поэтому вода имеет резко выраженные полярные свойства. Для воды $\mu = 6.1 \cdot 10^{-30}$ Кл·м.

Время дипольной поляризации, по Дебаю, составляет:

$$\tau = 4\pi\eta r^3/kT, \quad (2)$$

где η – динамическая вязкость молекулы; r – радиус молекулы, м; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Для воды при $r \approx 2 \times 10^{-10}$ м и $\eta \approx 1$ мПа·с (при нормальной температуре) расчет дает $\tau \approx 10^{-11}$ с. [3].

Практический интерес представляет электрический момент не одной молекулы, а суммы моментов диполей, находящихся в единице объема вещества, который называется вектором поляризации [1]:

$$\vec{P} = \frac{\sum ql}{V} = \frac{\sum \vec{P}_i}{V}. \quad (3)$$

Для сильнополярных диэлектриков вектор поляризации \vec{P} пропорционален напряженности приложенного электрического поля \vec{E} .

$$\vec{P} = \varepsilon_0 n \alpha \vec{E}, \quad (4)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость, 8.854×10^{-12} Ф/м; n – концентрация молекул, которые участвуют в поляризации, м⁻³; α – поляризуемость каждой молекулы, характеризующая ее наведенный электрический момент в единичном локальном поле, м³.

Уравнение Клаузиуса – Мосотти для полярных жидкостей выражает связь между макроскопическим параметром диэлектрика ε и его микроскопическим параметром α :

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{n}{3} \left(\alpha_0 + \frac{\vec{p}^2}{3\varepsilon_0 kT} R \right), \quad (5)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость вещества; \vec{p} – электрический момент диполя, Кл·м; R – редуцированный фактор, показывающий, во сколько раз по сравнению с газом изменяется дипольная поляризуемость вследствие «внутреннего трения» в жидкости.

Для воды $R = 0,2$ [2].

Диэлектрическая проницаемость ε зависит от различных внешних факторов, в том числе от температуры и давления.

Для увеличения точности практических расчетов более целесообразно использовать опытные данные для учета влияния температуры на диэлектрическую проницаемость вещества.

При движении диэлектрика в электростатическом поле следует учитывать взаимодействие электростатического и гидродинамического полей.

Теоретической базой при исследовании явлений, происходящих в ГЭППР, служат фундаментальные системы уравнений гидродинамики и электротехники, которые в совокупности образуют систему уравнений электрогидродинамики [4]. В случае униполярной проводимости, изотермических процессов в несжимаемой жидкости и с учетом эффекта поляризации движущейся жидкости, система уравнений электрогидродинамики в дифференциальной форме имеет вид:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\nabla \bar{V}) \bar{V} = \frac{1}{\rho_g} \bar{F}_o - \frac{1}{\rho_g} \Delta P + \nu \nabla^2 \bar{V} + \frac{1}{\rho_g} \bar{F}_e; \quad (6)$$

$$\nabla \bar{V} = 0; \quad (7)$$

$$\nabla E = 0; \quad (8)$$

$$\nabla E = \frac{\rho_e}{\varepsilon_a}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \bar{j} = 0; \quad (10)$$

$$\bar{j} = \rho_e b \bar{E} + \rho_e \bar{V} - D_g \nabla \rho_e + \nabla (\bar{P} \times \bar{V}) + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}, \quad (11)$$

где: \bar{V} – скорость течения жидкости, м/с; \bar{F}_o – объемная плотность неэлектрических сил, Н/м³; ρ_g – плотность жидкости, кг/м³; ΔP – перепад давления, заставляющий жидкость двигаться, Н; ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; \bar{F}_e – объемная плотность пондеромоторных сил, (А²/м⁴)с; \bar{E} – вектор напряженности электростатического поля, В/м; ρ_e – объемная плотность свободного электрического заряда, Кл/м³; ε_a – относительная диэлектрическая проницаемость; \bar{j} – вектор плотности полного тока, А/м²; b – коэффициент подвижности ионов в жидкости, м²/Вс; D_g – коэффициент диффузии ионов в жидкости, м²/с; $\nabla = (\partial/\partial x; \partial/\partial y; \partial/\partial z)$ – дифференциальный оператор Гамильтона; \bar{P} – вектор поляризации среды, Кл/м²; \bar{D} – вектор электрического смещения, В/м.

Рассмотрим подробно уравнения (6), (11):

- уравнение (6) – уравнение движения Навье – Стокса изотермического движения вязкой несжимаемой жидкости [5]

- уравнение (11) – уравнение полного тока, которое представляет собой обобщенный закон Ома. В уравнении полного тока вектор плотности полного тока \bar{j} определяется следующими составляющими:

$\rho_e b \bar{E}$ – ток проводимости, обусловленный естественной проводимостью жидкого диэлектрика и не зависящий от расхода (скорости) среды;

$\rho_e \bar{V}$ – конвективная составляющая;

$D_g \nabla \rho_e$ – плотность тока диффузии;

$\nabla (\bar{P} \times \bar{V})$ – плотность тока поляризации;

$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$

– ток смещения.

Для дальнейших теоретических исследований ГЭППР в открытых каналах, необходимо проанализировать уравнение (11) более подробно.

Первой составляющей уравнения полного тока является ток проводимости. Реальные диэлектрики имеют большое количество примесей, которые приводят к увеличению проводимости сильнополярных жидких диэлектриков. Уменьшить ток проводимости можно либо за счет электрической изоляции электродов от измеряемой среды, либо за счет снижения напряженности электростатического поля в МЭП.

Вторая составляющая уравнения полного тока (11) - конвективный ток $j_k = \rho_e \times \bar{V}$. Для того, чтобы минимизировать конвективную составляющую и ее влияние на работу ГЭППР, следует исключить возможность образования униполярного заряда в МЭП следующими способами:

1. Необходимо снизить напряженность электрического поля в МЭП с $E = 10^6$ В/м до более низких величин.

2. Провести правильный выбор формы электродов ГЭППР и тщательную обработку их поверхности, что позволит устранить образование униполярного заряда при напряженности поля в МЭП $E \approx 10^4 - 10^5$ В/м.

Третья составляющая уравнения полного тока – ток диффузии $j_g = D_g \nabla \rho_e$. Величина тока диффузии зависит от коэффициента диффузии D_g и градиента концентрации объемного заряда $\nabla \rho_e$. С учетом малой величины коэффициента диффузии 10^{-9} , током диффузии в нашем случае можно пренебречь.

Ток смещения $j_{cm} = \frac{\partial \bar{e}}{\partial t}$ принимаем равным нулю, так как в пространстве между электродами - электростатическое.

Таким образом, уравнение полного тока (11) для ГЭППР с плоскопараллельными электродами можно записать следующим образом:

$$\bar{J} = \rho_e b \bar{E} + \nabla(\bar{P} \times \bar{V}). \tag{12}$$

Первое слагаемое уравнения (12) – ток проводимости, величина которого не зависит от скорости движения жидкости в МЭП. Второе слагаемое - ток, обусловленный поляризацией диэлектрической жидкости, величина тока поляризации пропорциональна скорости, а, следовательно, и расходу жидкости в МЭП.

Конструктивное уравнение для ГЭППР (рис. 1) с учетом тока проводимости имеет следующий вид:

$$J_z = P_z \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_y \frac{\partial P_z}{\partial y} + \rho_e b P_z, \tag{13}$$

где: J_z – проекция вектора полного тока на ось z, А/м²; P_z – проекция вектора поляризации на ось z; V_y – проекция вектора скорости на ось y, м/сек; ρ_e – объемная плотность заряда, А/м³; b – коэффициент подвижности ионов в среде, м/Вс;

Данное уравнение является математической моделью ГЭППР.

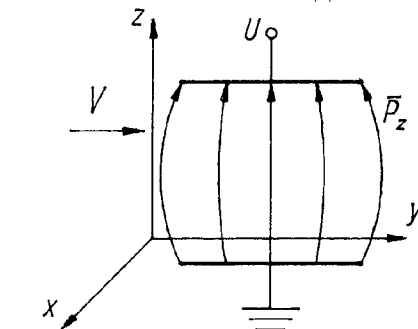


Рис. 1. Система электродов ГЭППР

Следует отметить, что особенностью работы ГЭППР в открытых каналах является постоянная скорость течения жидкости в межэлектродном промежутке. То есть нет градиента

скорости по оси y . Поэтому составляющая $\partial V_y / \partial y$ равна нулю. Переходим к модели, отображающей зависимость тока на выходе ГЭППР от расхода жидкости в межэлектродном промежутке.

$$J_z = V_y \frac{\partial P_z}{\partial y} + \rho_e b P_z. \quad (14)$$

С учетом (14), величина тока поляризации, пропорционального расходу жидкости зависит при прочих равных условиях от составляющей $\partial P_z / \partial y$, то есть от расположения электродов. Следовательно, выбор формы и взаимного расположения электродов является определяющей задачей при разработке конструкции ГЭППР в открытых (безнапорных) каналах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков. М.: Госэнергоиздат, 1963. 528 с.
2. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов: учеб пособие для вузов / Б.М. Тареев. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
3. Вилков Л.В. Физические методы исследования в химии. Структурные методы и оптическая спектроскопия: учеб. для химич. спец. Вузов / Л.В. Вилков, Ю.А. Пентин. М.: Высшая школа, 1987. 367 с.
4. Денисов А.А. Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики / А.А. Денисов, В.С. Нагорный. Л.: Машиностроение, 1979. 288 с.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. М.: Наука, 1970. 940 с.

Садчикова Галина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал) Саратовского государственного технического университета

Мамолина Анна Петровна – аспирант кафедры «Технология и автоматизация машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал) Саратовского государственного технического университета

Sadchikova Galina Mihajlovna – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of «Technology and automation of engineering industry» of Balakovo Institute of Techniques, Technology and Management (branch) of the Saratov State Technical University

Mamolina Anna Petrovna – post-graduate student of the Department of «Technology and automation of engineering industry» of Balakovo Institute of Techniques, Technology and Management (branch) of the Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК.621.873

Н.М. Чернова, Р.А. Кобзев

ВЫБОР ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ КОЗЛОВЫХ КРАНОВ

Рассматривается вопрос выбора целевой функции оптимального проектирования несущих металлических конструкций козловых кранов. Нахождение оптимальных значений параметров металлических конструкций позволит существенно сократить затраты на изготовление и эксплуатацию крана.

Козловый кран, класс ответственности, оптимальное проектирование, несущая металлическая конструкция, капитальные затраты, эксплуатационные затраты, металлоемкость, энергоемкость, трудоемкость

N.M.Chernova, R.A.Kobzev

CHOICE OF CRITERION FUNCTION IN TERMS OF GANTRY CRANE METALWORKS OPTIMUM DESIGN

The problem of criterion function choice at optimum projection of bearing metalworks of gantry cranes is considered. Determination of metalworks parameters optimum value will allow to reduce manufacturing and operational costs essentially.

Gantry crane, optimum projection, bearing metalwork, capital costs, operational costs, metal consumption, power consumption, labour input

Оптимальное проектирование позволяет при решении инженерных задач выбрать наилучшее из всех возможных вариантов конструкции. Для сравнения вариантов в этом случае применяются критерии оптимальности, при определении которых используются функции цели или целевые функции. Экстремумы целевой функции и являются по своей природе оптимальным значением конструкции по входящим в целевую функцию критериям.

Наиболее часто используемыми критериями при оптимальном проектировании являются стоимость, вес, прочность, габаритные размеры, производительность и другие параметры. Одновременное достижение наилучших значений всех параметров в одной точке пространства невозможно, поэтому целевая функция определяет наиболее рациональное сочетание всех параметров. В частности, широко распространено выражение приоритетности того или иного параметра с помощью весовых коэффициентов. Однако наиболее точные результаты при оптимальном проектировании машин дает использование обобщенных критериев, позволяющих оценить конструкцию по всем видам затрат.

В качестве таких критериев наиболее часто рекомендуются минимумы суммарных затрат [1].

$$S = K + N \cdot U, \quad (1)$$

где K – капитальные затраты на изготовление металлоконструкции; U – текущие годовые затраты на металлоконструкцию крана; N – срок службы крана.

В число капитальных затрат на изготовление крана входят: стоимость материалов, требуемых для изготовления крана, стоимость работ по изготовлению крана, включая стоимость изготовления необходимой технологической оснастки, стоимость необходимого для изготовления крана технологического оборудования, а также стоимость монтажа, т.е.

$$K = G_m + C_u + \frac{C_{occ} + C_{mo}}{Z} + C_{mont}, \quad (2)$$

где C_m – стоимость материалов; C_u – стоимость работ по изготовлению; C_{occ} – стоимость технологической оснастки; G_{mo} – стоимость технологического оборудования, необходимого для изготовления крана; Z – объем выпускаемой серии, C_{mont} – стоимость монтажа.

Основным материалом, используемым при производстве металлических конструкций является сталь, затраты на приобретение стали можно выразить как

$$C_{cm} = C_{cm} * G, \quad (3)$$

где C_{cm} – стоимость стали; G – общая металлоемкость конструкции.

Помимо стали также используются прочие материалы: электроды и сварочная проволока, грунт, эмали и др. Общие затраты на их приобретение выразим как сумму затрат на приобретение каждого материала

$$C_{nm} = \sum C_i * G_i \quad (4)$$

где C_i – стоимость i -го материала; G_i – необходимая масса i -го материала.

Обращая внимание, что потребное количество электродов или сварочной проволоки зависит от суммарной длины сварных швов, необходимое количество грунта и эмали – от общей площади конструкции, а эти параметры в свою очередь связаны с металлоемкостью крана, получим выражение

$$C_{nm} = \sum C_i * G * K_i, \quad (5)$$

где K_i – постоянный коэффициент пропорциональности для i -го материала.

Затраты на изготовление можно представить в виде

$$C_u = K_u * T_u, \quad (6)$$

где K_u – постоянный коэффициент трудоемкости изготовления конструкции, T_u – общая трудоемкость изготовления.

Согласно [2] общая трудоемкость изготовления металлических конструкций складывается из стоимости обработки деталей конструкции и сборки деталей конструкции

$$T_u = T_{об} + T_{сб} = a_n^{об} * \sqrt{G * n} + a_n^{сб} * \sqrt{G * n}, \quad (7)$$

где $T_{об}$ – трудоемкость обработки (включая трудоемкость заготовительных операций и термической обработки), $T_{сб}$ – трудоемкость сборки (включая трудоемкость выполнения сварных соединений), $a_n^{об}, a_n^{сб}$ – коэффициенты пропорциональности, n – количество элементов конструкции.

По аналогии затраты на изготовление оснастки

$$C_o = K_{uo} * T_{uo} \quad (8)$$

$$T_{uo} = T_{обо} + T_{сбо} = a_n^{обо} * \sqrt{G_o * n_o} + a_n^{сбо} * \sqrt{G_o * n_o} \quad (9)$$

Примем, что вес оснастки пропорционален весу изготавливаемой конструкции с некоторым коэффициентом пропорциональности $K_{ос}$, и получим следующее выражение

$$T_{uo} = T_{обо} + T_{сбо} = a_n^{обо} * \sqrt{G * K_o * n_o} + a_n^{сбо} * \sqrt{G * K_o * n_o} \quad (10)$$

Учитывая, что стоимость технологического оборудования напрямую зависит от размеров обрабатываемых деталей, а они, в свою очередь, связаны с общей металлоемкостью конструкции, верно выражение

$$C_{oi} = f(G) \quad (11)$$

или

$$C_{oi} = K_i * G, \quad (12)$$

где K_i – постоянный коэффициент пропорциональности.

Стоимость монтажа [2]

$$C_{монт} = K_m * T_{монт} + C_{nm} \quad (13)$$

где $T_{монт}$ – трудоемкость монтажа; K_m – постоянный коэффициент пропорциональности; C_{nm} – затраты, не связанные с трудоемкостью монтажа.

$$T_{монт} = \sum (a_j + b_j * G_j) = G \sum \left(\frac{a_j}{G_j} + b_j \right) \quad (14)$$

где a_j, b_j – коэффициенты, зависящие от трудоемкости, укрупнения и установки элементов конструкции; G_j – вес отдельного элемента конструкции.

Текущие годовые или эксплуатационные затраты включают в себя амортизационные отчисления на реновацию и затраты на текущие ремонты

$$U = C_{рен} + C_{рем}, \quad (15)$$

где $C_{рен}$ – затраты на восстановление работоспособности (реновацию); $C_{рем}$ – затраты на текущие ремонты.

Затраты на реновацию определяются как

$$C_{рен} = \frac{C_m + C_u + C_{монт}}{N} \quad (16)$$

Затраты на текущий ремонт принимаем пропорциональными массе металлической конструкции, поскольку трудоемкость основных операций (покраска, подтяжка болтовых соединений и др.) напрямую зависит от объема выполняемых работ, а он, в свою очередь, пропорционален массе металлоконструкции.

$$C_{рем} = K_{рем} * G, \quad (17)$$

где $K_{рем}$ – постоянный коэффициент пропорциональности.

На основании всего вышесказанного целевая функция оптимального проектирования металлическую конструкцию крана примет вид

$$S = C_{см} * G + \sum C_i * G * K_i + K_u * (a_n^{об} * \sqrt{G * n} + a_n^{сб} * \sqrt{G * n}) + \frac{K_{uo} * a_n^{обо} * \sqrt{G * K_o * n_o} + a_n^{сбо} * \sqrt{G * K_o * n_o} + K_n * G}{Z} + K_m * G \sum (\frac{a_j}{G_j} + b_j) + C_{нм} \quad (18)$$

$$+ (\frac{C_{см} * G + \sum C_i * G * K_i + K_u * (a_n^{об} * \sqrt{G * n} + a_n^{сб} * \sqrt{G * n}) + K_m * G \sum (\frac{a_j}{G_j} + b_j)}{N} + K_{рем} * G) * U$$

Очевидно, что данное выражение весьма громоздко и неудобно в использовании. Проанализировав его, обнаружим, что во всех слагаемых за $C_{нм}$ присутствует в качестве множителя металлоемкость конструкции. Предположив, что постоянные затраты при монтаже, не связанные с трудоемкостью монтажа, равнозначны для всех рассматриваемых вариантов конструкции, функцию цели можно представить в следующем виде

$$S = G * (C_{см} + \sum C_i * K_i + K_u * (a_n^{об} * \sqrt{n/G} + a_n^{сб} * \sqrt{n/G}) + \frac{K_{uo} * a_n^{обо} * \sqrt{K_o * n_o / G} + a_n^{сбо} * \sqrt{G * K_o * n_o / G} + K_n}{Z} + K_m * \sum (\frac{a_j}{G_j} + b_j) + C_{нм}) \quad (19)$$

$$+ (\frac{C_{см} + \sum C_i * K_i + K_u * (a_n^{об} * \sqrt{G * n / G} + a_n^{сб} * \sqrt{G * n / G}) + K_m * \sum (\frac{a_j}{G_j} + b_j)}{N} + K_{рем}) * U$$

Исходя из полученного выражения, можно сделать вывод, что основным параметром влияющим на суммарные затраты на изготовление и эксплуатацию металлоконструкции является металлоемкость. На основании этого предлагается для упрощения решаемой задачи в качестве критерия оптимальности использовать металлоемкость крана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаумян Г.А. Обоснование и расчет сроков службы и эффективности новой техники / Г.А. Шаумян // Изв. вузов. Машиностроение. №1. 1973. 359 с.
2. Лихтарников Я.М. Металлические конструкции. Методика технико-экономического анализа при проектировании / Я.М. Лихтарников. М.: Стройиздат, 1968. 312 с.

Чернова Наталья Михайловна – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Высшая математика и механика» Балаковского института техники,

Chernova Natalia Mikhailovna – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of «The higher Mathematics and Mechanics» of Balakovo

технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Кобзев Роман Анатольевич – кандидат технических наук, докторант кафедры «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Institute of Technique, Technology and Management (branch) of Saratov State Technical University

Kobzev Roman Anatolyevich – Candidate of Technical Sciences, Doctoral Student of the Department of «Hoisting-and-Transport, Building and Road Machines» of Balakovo Institute of Technique, Technology and Management (branch) of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК.621.873

Н.М. Чернова, Р.А. Кобзев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ КРАНОВ ВЫСОКИХ КЛАССОВ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

Предлагается при оптимальном проектировании металлоконструкций кранов высоких классов ответственности применять вероятностный анализ безопасности. Подобный подход позволит при определении коэффициента запаса прочности элементов металлоконструкции учитывать статистику отказов подобных элементов, а также степень ответственности отдельного элемента и крана в целом.

Грузоподъемные краны, класс ответственности, оптимальное проектирование, металлоконструкция, вероятностный анализ безопасности, анализ риска отказа

N.M. Chernova, R.A. Kobzev

USE OF THE PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS IN TERMS OF OPTIMUM PROJECTION OF HIGH CLASS RESPONSIBILITY CRANES METALWORKS

In terms of optimum projection of high class responsibility cranes metalworks it is suggested to apply the probabilistic safety analysis. The similar approach will allow to consider the statistics of metalwork elements failure in terms of their safety factor definition, and also a responsibility level of a separate element and crane as a whole.

Cranes, responsibility class, optimum projection, metalwork, probabilistic safety analysis, failure risk analysis

Согласно ГОСТ 28609-90 «Краны грузоподъемные. Общие положения расчета» [1] к первому классу ответственности относятся механизмы подъема, изменения вылета, а также несущие металлоконструкции кранов, обслуживающих металлургическое производство, кранов атомных энергетических объектов, а также кранов, обслуживающие особо ответ-

ственный технологический процесс при отсутствии резервирования. Отказы подобных кранов влекут за собой весьма значительный экономический, а в ряде случаев экологический и социальный ущерб. В связи с высокими требованиями к безопасности, вызванными высоким уровнем потенциального ущерба при отказе, металлоконструкции указанных кранов отличаются большой массой и громоздкостью.

К сожалению, на сегодняшний день в нормативной литературе практически отсутствуют четкие рекомендации относительно выбора коэффициента запаса элементов металлоконструкции крана в зависимости от степени ответственности крана, а также от степени ответственности рассматриваемого элемента, т.е. о степени его влияния на отказ всей системы в целом. В частности, основной нормативный документ, принятый в краностроении, ПБ 10-382-00 [2], регламентирует только коэффициенты запаса грузовых канатов, причем в зависимости только от группы классификации режима работы крана. В технической литературе [3] встречаются рекомендации общего порядка назначать коэффициенты запаса для элементов металлоконструкции равными 1,6 для кранов, транспортирующих жидкий металл и 1,4 для прочих кранов. Подобный подход также весьма усреднен и не учитывает степень ответственности рассматриваемых кранов и от дельных элементов их металлоконструкций, поэтому не может быть применен при проектировании металлоконструкций кранов высоких классов ответственности.

Решение задачи оптимального проектирования металлических конструкций возможно лишь при поэлементном подходе к отдельным частям металлоконструкции с определением индивидуального коэффициента запаса каждого элемента. В качестве инструмента для определения степени ответственности каждого рассматриваемого элемента металлической конструкции может выступить вероятностный анализ безопасности (ВАБ) с применением методов анализа риска отказа. ВАБ позволит количественно установить зависимость отказа всей металлической конструкции от отказа отдельных ее элементов.

Применим ВАБ для определения коэффициента запаса элементов металлоконструкции на наиболее простом примере мостового крана, имеющего классическую двухбалочную металлоконструкцию.

В качестве метода риск анализа используем логико-графический дедуктивный метод анализа дерева отказов, широко применяемый в нашей стране для ВАБ технических систем [4,5].

На первом этапе проводится структурный анализ конструкции, и выявляются причинно-следственные связи между отказами отдельных элементов, систем и подсистем. В итоге вероятность появления *вершинного* или *исходного* события выражается через вероятности появления *конечных* событий. В нашем случае исходным событием является отказ металлоконструкции в целом. Структурно металлическая конструкция мостового крана состоит из двух продольных и двух поперечных балок, соединяемых между собой либо с помощью сварки, либо на чистовых болтах. Соответственно, отказ металлической конструкции появляется в случае отказа любой из четырех балок системы, а также любого из четырех узлов соединений балок. Обозначив риск отказа всей металлоконструкции как $Q(t)$, получим

$$Q(t) = 2 * Q_g(t) + 2 * Q_m(t) + 4 * Q_c(t), \quad (1)$$

где $Q_g(t)$ – риск отказа главной балки крана; $Q_m(t)$ – риск отказа торцевой балки крана; $Q_c(t)$ – риск отказа узла соединения главной и торцевой балки.

Отказ главной балки может наступить в случае появления отказа верхнего или нижнего пояса, а также любой из стенок.

$$Q_g(t) = Q_{onc}(t) + Q_{nnc}(t) + 2 * Q_{cc}(t), \quad (2)$$

где $Q_{onc}(t)$ – риск отказа верхней полки главной балки; $Q_{nnc}(t)$ – риск отказа нижней полки главной балки; $Q_{cc}(t)$ – риск отказа стенки главной балки.

Аналогично для торцевой балки

$$(3)$$

где $Q_{onm}(t)$ – риск отказа верхней полки торцевой балки; $Q_{nmm}(t)$ – риск отказа нижней полки торцевой балки; $Q_{cm}(t)$ – риск отказа стенки торцевой балки.

Очевидно, что отказ отдельной стенки или полки является конечным событием, выразим вероятность появления вершинного события через вероятности конечных событий.

$$Q(t) = 2 * (Q_{enl}(t) + Q_{iml}(t) + 2 * Q_{ce}(t)) + 2 * (Q_{enm}(t) + Q_{imm}(t) + 2 * Q_{cm}(t)) + 4 * Q_c(t) = 2 * Q_{enl}(t) + 2 * Q_{ce}(t) + 4 * Q_{ce}(t) + 2 * Q_{enm}(t) + 2 * Q_{imm}(t) + 4 * Q_{cm}(t) + 4 * Q_c(t) \quad (3)$$

Графически данную зависимость можно отобразить с помощью дерева отказов (рис. 1).

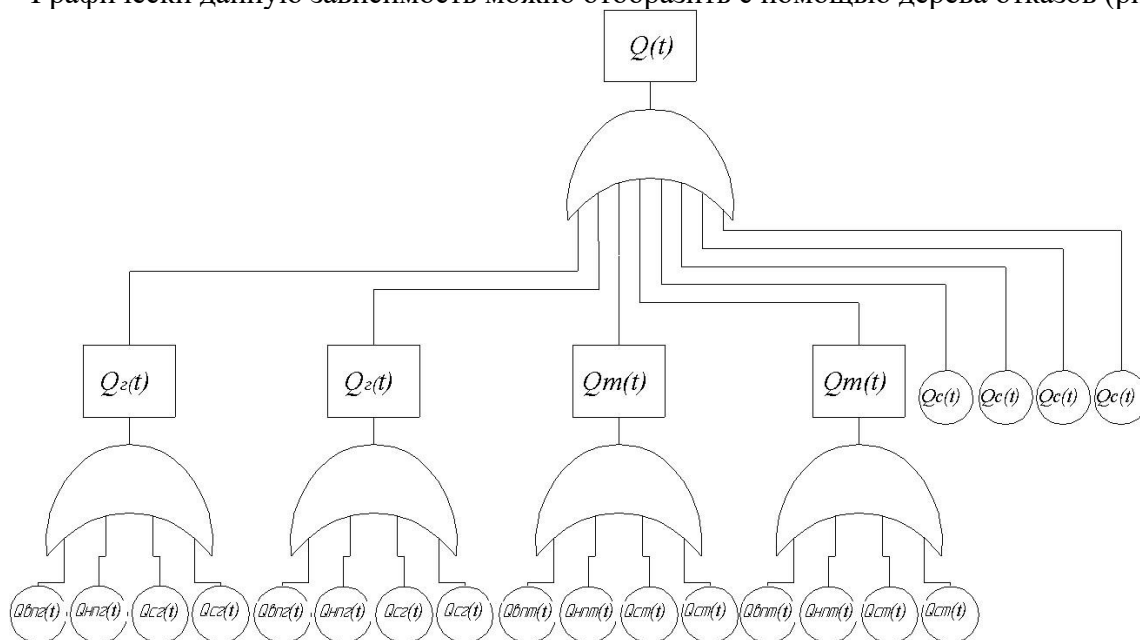


Рис.1. Дерево отказов металлоконструкции мостового крана

Для элементов с экспоненциальным распределением отказов во времени, который применим к большинству технических систем, риск отказа выражается через интенсивность отказов [4]

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda * t}, \quad (4)$$

где λ – интенсивность отказа элемента, то есть вероятное количество отказов элемента в год согласно статистическим данным.

В работе [6] приведены статистические данные по интенсивности отказов элементов мостовых кранов. Отберем нужные сведения и поместим их в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	Наименование элемента	Интенсивность отказа, 1/год
1.	Отказ стенки главной балки	$2,9741 \cdot 10^{-5}$
2.	Отказ верхней полки главной балки	$2,4012 \cdot 10^{-5}$
3.	Отказ нижней полки главной балки	$2,1935 \cdot 10^{-5}$
4.	Отказ стенки торцевой балки	$3,9762 \cdot 10^{-5}$
5.	Отказ верхней полки торцевой балки	$2,3018 \cdot 10^{-5}$
6.	Отказ нижней полки торцевой балки	$2,7349 \cdot 10^{-5}$
7.	Узел соединения главной и торцевой балок	$3,6174 \cdot 10^{-5}$

Учитывая, что интенсивность отказа выражается в количестве отказов в год, очевидно, что риск отказа элемента в течение года будет равно интенсивности отказов рассматриваемого элемента.

Подставив значения интенсивности отказов в выражение (3), получим риск отказа металлоконструкции равный $Q(t) = 6,153 \cdot 10^{-4}$ 1/год.

В атомной энергетике уровень допустимого риска для металлических конструкций наиболее ответственных кранов принимается равным 10^{-5} 1/год [7]. Для кранов выполняющих менее ответственные операции - 10^{-4} 1/год.

Очевидно, что статистические данные отражают вероятность наступления отказа при базовом коэффициенте запаса принятым согласно рекомендациям [3] равным 1,4. Таким образом, проведенный вероятностный анализ безопасности показал, что исходное значение коэффициента запаса 1,4 не может быть принято ни для первой, ни для второй группы кранов АЭС.

Определим значения необходимого коэффициента запаса для каждого элемента металлической конструкции крана, необходимого для обеспечения общей величины риска отказа менее 10^{-5} и 10^{-4} 1/год. Для определения влияния коэффициента запаса на риск отказа элемента рассмотрим следующий пример.

Предположим, что два элемента некоторой системы идентичны, работают параллельно и имеют интенсивность отказа λ . Отказ системы из двух элементов возможен при одновременном отказе обоих элементов, тогда вероятность отказа всей системы равна произведению вероятностей отказа отдельных элементов

$$Q(t) = Q_1(t) * Q_2(t) = (1 - e^{-\lambda * t}) * (1 - e^{-\lambda * t}) = (1 - e^{-\lambda * t})^2 \quad (5)$$

Очевидно, что с точки зрения надежности, система из двух одинаковых параллельно работающих элементов идентична системе из одного элемента, но имеющего двукратный запас. Таким образом, если увеличить коэффициент запаса элемента в k раз, то его риск отказа составит

$$Q(t) = (1 - e^{-\lambda * t})^k \quad (6)$$

Для нахождения однозначного решения примем, что вероятности наступления всех конечных событий после уточнения коэффициентов запаса будет одинаковой, на практике это означает, что отказ всех элементов металлоконструкции будет равновероятен.

Тогда обозначив величину риска отказа одного элемента за $Q_0(t)$, подставим его в выражение (3)

$$Q(t) = 20 * Q_0(t) \quad (7)$$

Приравняв величину риска отказа к величинам допустимого риска для первой и второй групп кранов, получим $Q_0(t) = 5 * 10^{-7}$ 1/год для первого случая и $Q_0(t) = 5 * 10^{-6}$ для второго случая. Используя выражение (6), определим значения уточняющего коэффициента k и необходимого коэффициента запаса прочности z для всех элементов металлоконструкции в обоих случаях, результаты сведем в Таблицу 2.

Таблица 2

№ № п/п	Наименование элемента	Величина допустимого риска 10^{-5} 1/год		Величина допустимого риска 10^{-4} 1/год	
		k	z	k	z
1.	Стенка главной балки	1,392	1,949	1,172	1,641
2.	Верхняя полка главной балки	1,364	1,91	1,148	1,607
3.	Нижняя полка главной балки	1,353	1,894	1,138	1,593
4.	Стенка торцевой балки	1,432	2,005	1,205	1,687
5.	Верхняя полка торцевой балки	1,359	1,903	1,143	1,6
6.	Нижняя полка торцевой балки	1,381	1,933	1,162	1,627
7.	Узел соединения главной и торцевой балок	1,419	1,987	1,194	1,671

Таким, используя вероятностный анализ безопасности, нам удалось определить необходимые значения коэффициентов запаса прочности элементов металлоконструкции мостового крана для обеспечения заданных уровней безопасности. Подобный подход применим к любым техническим конструкциям высокого класса ответственности и позволяет учесть статистику отказов и степень ответственности каждого из элементов. Основным недостатком данного метода является его зависимость от полноты имеющейся статистики по интенсивностям отказов отдельных элементов, в то же время стоит отметить, что по мере накопления статистических данных точность метода будет постоянно увеличиваться.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 28609-90 Краны грузоподъемные. Общие положения расчета. М.: Стандартинформ, 2005. 6 с.
2. ПБ 10-382-00. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов // Промышленная безопасность при эксплуатации грузоподъемных кранов: сборник документов. М.: Государственное предприятие Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. Серия 10. Выпуск 7. С. 6-254.
3. Справочник по кранам: в 2 т. Т. 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций / В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И.Е. Звягин и др. Л.: Машиностроение, 1988. 566 с.
4. Хенли Э.Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э.Дж. Хенли, Х. Кумамото. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
5. РД 08-120-96. Методические указания по проведению анализа риска опасных промышленных объектов. М.: Госгортехнадзор России, 1996. 12 с.
6. Чичерин С.С. Повышение безопасности мостовых кранов на основе анализа и оценки риска эксплуатации конструктивных элементов металлоконструкции. диссерт. канд. техн. наук. Новочеркасск. НГТУ, 1998. 153 с.
7. ПНАЭ Г I-011-97. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88/97) / Госатомэнергонадзор СССР. М.: Энергоатомиздат, 1997. 48 с.

Чернова Наталья Михайловна – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Высшая математика и механика» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Кобзев Роман Анатольевич – кандидат технических наук, докторант кафедры «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета

Chernova Natalia Mikhailovna – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of «The higher Mathematics and Mechanics» of Balakovo Institute of Technique, Technology and Management of Saratov State Technical University

Kobzev Roman Anatolyevich – Candidate of Technical Sciences, Doctoral Student of the Department of «Hoisting-and-Transport, Building and Road Machines» of Balakovo Institute of Technique, Technology and Management (branch) of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

ФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 681.5; 621.385

Е.Р. Кожанова, А.А. Захаров

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОТБРАКОВКИ И НАСТРОЙКИ МАГНИТНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

В статье рассматривается построение экспертной системы отбраковки и настройки магнитной периодической фокусирующей системы на основе базы фрагментов сечения вейвлет-спектрограмм при масштабе $a=1$, которые получаются при непрерывном вейвлет-преобразовании дихотомического сигнала (вейвлет Хаара). Дихотомический сигнал является диагностическим вектором величин максимальных амплитуд продольного распределения магнитного поля, совпадающего с центром любого постоянного магнита.

Экспертная система, продольное распределение, магнитная периодическая фокусирующая система, фокусировка электронного потока, дихотомический сигнал, диагностический вектор, вейвлет-преобразование, вейвлет Хаара, вейвлет-спектрограмма

E.R. Kozhanova, A.A. Zakharov

POSSIBILITY OF APPLICATION OF EXPERT SYSTEM OF REJECTION AND CONTROL MAGNETIC PERIODIC FOCUSING SYSTEM

In article creation of expert system of rejection and control of magnetic periodic focusing system on the basis of the base of fragments of section of wavelet-spectrograms is considered at scale $a=1$ which turn out at continuous wavelet-transformation of a dichotomizing signal (wavelet Haar). The dichotomizing signal is a diagnostic vector of sizes of the maximum amplitudes of longitudinal distribution of the magnetic field coinciding with the center of any constant magnet.

Expert system, longitudinal distribution, magnetic periodic focusing system, focusing of an electronic stream, dichotomizing signal, diagnostic vector, wavelet-transformation, wavelet -spectrogram, wavelet Haar, wavelet -transformation

Экспертные системы, основанные на знаниях экспертов (базы знаний) и процедуры логического вывода, применяются для решения сложных задач диагностики. Рассмотрим принцип работы такой системы (рис. 1):

- пользователь передает в экспертную систему факты или другую информацию;
- экспертная система обрабатывает полученные данные, используя базу знаний, и на основании логического вывода формирует заключения;
- полученные заключения экспертной системы выдаются пользователю в виде экспертных знаний или рекомендаций.

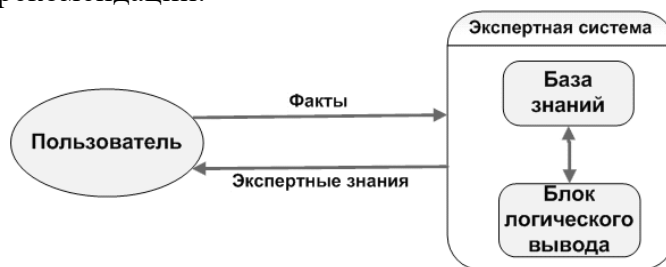


Рис. 1. Схема функционирования экспертной системы

Прежде чем магниты поступают на сборку МПФС, они проходят через несколько предварительных процедур (этапов):

1. Технологическое производство отдельных магнитов из соответствующих материалов определенных размеров.
2. Намагничивание магнитов.
3. Измерение параметров магнитов.
4. Отбраковка магнитов не имеющих заданных параметров, в том числе по величине продольной составляющей магнитного поля на оси B_{z0} .
5. Сегментирование отдельных магнитов для облегчения технологической сборки МПФС.

Предлагаемая методика диагностирования магнитной периодической системы (МПФС) включает 6 этапов (рис.2).



Рис. 2. Процесс диагностики МПФС

Первый этап – сборка МПФС из отобранных магнитов, как правило, разрезанных на отдельные сегменты и скрепленных необходимыми хомутами.

На *втором этапе* с помощью измерительного оборудования на базе, например, датчика Холла, проводят измерение, визуализацию и прописывание распределения магнитного поля на оси МПФС.

На *третьем этапе* определяют (задают) допустимую вариацию магнитного поля на оси МПФС в области отдельных магнитов, обеспечивающую необходимую фокусировку электронного потока.

Четвертый *этап* является основным, так как в зависимости от правильности кодирования информации будет зависеть правильность прогноза и принятия решения о работоспособности МПФС с точки зрения обеспечения качественной фокусировки. Диагностический вектор состояния МПФС [1]:

$$S = (s_1, s_2, s_3 \dots s_N), \tag{1}$$

где s_j – признак (параметр) состояния, имеющий разрядность 2 (кодирование с помощью 0 и 1); N – количество постоянных магнитов в МПФС.

Запишем правило кодирования дихотомического сигнала (1). Для этого зададим значения магнитной индукции B_0 , которое является расчетным значением с допустимой вариацией ΔB ($5 \div 10\% B_0$). Следовательно, магнитные характеристики постоянных магнитов МПФС должны соответствовать не конкретному значению B_0 , а интервалу $B_0 \pm \Delta B$ (рис. 3).

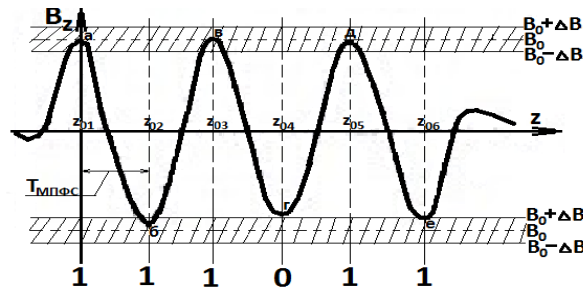


Рис. 3. Иллюстрация к правилу кодирования дихотомического сигнала

На рис. 3 показано продольное распределение магнитного поля МПФС, состоящее из шести постоянных магнитов. На оси z обозначены шесть центров магнитов ($z_{01} - z_{06}$), через которые проведены вертикальные пунктирные линии и на них показаны точки $a - e$. Горизонтальными линиями обозначены значения $\pm B_0$ и интервалы $|B_0| \pm \Delta B$. Видно, точки $a - e$ принадлежат или не принадлежат данным интервалам $|B_0| \pm \Delta B$ (рис. 3, области заштрихованы). Следовательно, правило кодирования представляется в следующем виде:

$$s_j = \begin{cases} 1 & [|B| \geq |B_0| - \Delta B] \wedge [|B| \leq |B_0| + \Delta B] \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \tag{2}$$

Если точка максимума продольного распределения, соответствующая центру любого постоянного магнита, входящего в МПФС, попадает в интервал $|B_0| \pm \Delta B$, то признак $s_j = 1$, в противном случае $s_j = 0$. В результате получается дихотомический сигнал S .

Процедура *пятого этапа* описана в работах [1], где авторы предлагают для вейвлет-анализа дихотомического сигнала использовать непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) с применением вейвлет-функции Хаара (Haar). В качестве характеристики для сравнения и анализа предложено использовать сечение полученной вейвлет – спектрограммы при масштабе $a = 1$ для наилучшего определения локализации нулей и единиц в дихотомическом сигнале (параметры НВП: максимальный масштаб НВП – 16, шаг НВП – 1).

Шестой *этап* представляет собой экспертную систему, которая должна дать прогноз о работоспособности МПФС и рекомендации, какие постоянные магниты данной системы подлежат замене. Если четвертый этап позволяет судить об обеспечении необходимого уровня магнитной индукции каждым магнитом МПФС, то на данном этапе глав-

ной задачей является определение участков магнитной системы, которые дают расфокусировку электронного потока. Из практических соображений можно предложить определенные рекомендации, например:

- если два и более соседних магнитов, не обеспечивают заданный уровень магнитной индукции, т.е. согласно правилу кодирования появляются подряд два или более нулей, то следует заменить эти магниты.

- если один магнит не обеспечивает заданный уровень магнитной индукции, то он должен с двух сторон быть окружен по 3-4 магнитами, обеспечивающие уровень магнитной индукции, что будет препятствовать расфокусировке электронного потока, создаваемого данным магнитом. При этом правило кодирования будет иметь вид: 1 1 1 0 1 1 1.

Авторами были рассмотрены различные виды МПФС, в том числе содержащие такие последовательности магнитов, которые создают расфокусировку электронного потока. Приведем некоторые из них (рис. 4) и на их базе создается база данных фрагментов.

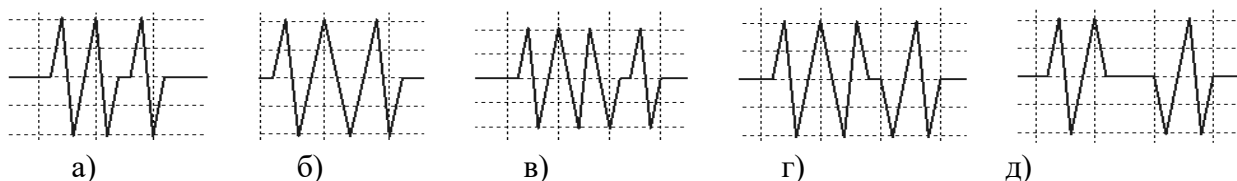


Рис. 4. Фрагменты графиков сечения при масштабе $a = 1$, создающие расфокусировку электронного потока [1]

Сопоставление полученного графика сечения вейвлет-спектрограммы (после завершения этапа 5) и фрагментов из базы данных фрагментов (рис. 4), обеспечивающих расфокусировку (назовем эти фрагменты «проблемными»), на различных участках всего сигнала позволяет сделать вывод о работоспособности МПФС с точки зрения обеспечения качественной фокусировки электронного потока.

Если же вывод делается о неработоспособности МПФС, то необходимо определить местоположение магнитов, подлежащих замене. Определение местоположение может быть осуществлено двумя способами:

- 1) в работе авторов [1] приведен алгоритм восстановления исходного сигнала графику сечения вейвлет-спектрограммы при масштабе $a=1$.
- 2) извлечения диагностического вектора данной МПФС из базы диагностических векторов всех замеров, которую необходимо создать для учета проведенных замеров.

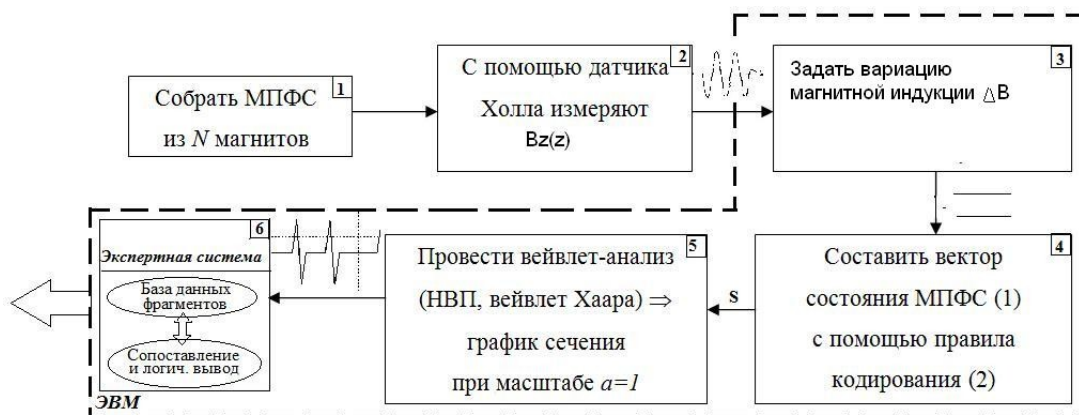


Рис. 5. Процесс диагностики МПФС с экспертной системой

В результате пользователь получает рекомендацию по замене магнитов, в которой указывается последовательный номер магнита или магнитов, подлежащие замене.

Следовательно, процесс диагностики МПФС (рис. 2), с учетом вышеизложенного, может быть представлен в виде последовательности операций (рис. 5). Автоматизация этапов 3 – 6 позволит снизить время на отбраковку и настройку магнитных систем, что повысит эффективность процесса сборки и диагностики МПФС.

Целесообразно описанный процесс диагностики МПФС распространить и на предварительные этапы, описанные выше, и связанные с отбраковкой отдельных магнитов до начала сборки МПФС.

В дальнейшем планируется разработать экспертную систему, являющуюся составной частью программного обеспечения этапов 3 - 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров А.А. Применение вейвлет–преобразований для анализа дихотомического сигнала / А.А. Захаров, Е.Р. Кожанова // Вестник Саратовского государственного технического университета. № 3 (40) Выпуск 1, 2009. С. 59–65.

Кожанова Евгения Романовна – аспирант кафедры «Электронные приборы и устройств» Саратовского государственного технического университета

Kozhanova Evgeniya R. – Postgraduate, Department of Electronic Instruments and Devices of the Saratov State Technical University

Захаров Александр Александрович - доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройств» Саратовского государственного технического университета

Zakharov Alexander A. - Dr. Sc., Professor, Department of Electronic Instruments and Devices of Saratovvsky state technical university

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 620.193+537.311.5

Е.Н. Минаев

МЕТОД РАСЧЁТА ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЩЕЛЬ – ПЛОСКАЯ ПОВЕРХНОСТЬ

Сформулированы краевые задачи распределения потенциала в щели и по плоской поверхности. Разработан метод совместного решения указанных задач. Выявлена количественная закономерность влияния трещины на распределение потенциала по поверхности. Предложенный метод расчета может быть использован при прогнозировании коррозии металла.

Электрохимические системы, электрическое поле, расчёт, коррозия

E.N. Minaev

METHOD FOR CALCULATION OF ELECTRICAL FIELD IN THE ELECTROCHEMICAL SYSTEM CHINK - PLANE SURFACE

The method for calculation of field in the electrochemical system chink-plane surface is presented in this paper. Boundary tasks for electrical potential in the plane surface and chink are examined. Influence of chink on the surface is investigated. This method may be used for prognostication of metal corrosion.

Electrochemical systems, electrical field, calculation, corrosion

Введение

При прогнозировании электрохимической коррозии различного рода гальванопар и многоэлектродных систем, имеющих протяженные размеры, возникает задача расчёта электрического поля в электролите и по границе электрод-раствор на основе решения стационарной краевой задачи в частных производных для потенциала [1]. Под электродом в данной работе понимается любая металлическая поверхность, контактирующая с жидкостью. Для контактной коррозии характерна значительная неравномерность распределения разрушений по поверхности металла, которая достигает максимального значения в области контакта со стороны анода. Так по данным [2], средняя скорость коррозии корпусной стали 10ХСНД в морской воде равна 0.13 мм/год, в то время, как максимальная скорость коррозии этой стали при контакте с нержавеющей сталью равна 2.5 мм/год. Особенно опасны случаи, когда площадь анода намного меньше, чем у катода. В силу равенства суммарных токов на электродах и большого различия в площадях, плотность анодного тока во много раз больше, чем на катоде.

Скорость контактной коррозии в многоэлектродных системах можно определить экспериментально, измеряя плотность тока двухзондовым методом. Но такое измерение является сложным и плохо воспроизводимым экспериментом. Непосредственное же определение коррозионных разрушений по убыли массы металла, или глубине разрушения связано с большими затратами времени и позволяет оценить их только после того как процесс закончился. Поэтому, кроме экспериментальных, желательно использовать и расчётные методы прогнозирования.

Отличительной особенностью гальванопар и многоэлектродных систем является их поляризуемость. С математической точки зрения это означает, что на электродах выполняется граничное условие третьего рода.

$$\varphi - \mu \frac{\partial \varphi}{\partial y} = g$$

где φ – электрический потенциал на границе, $\mu = \alpha \lambda$, α – удельная поляризуемость металла, λ – удельная электропроводность раствора, g – электрохимический потенциал на границе при отсутствии внешнего тока, y – координата, направленная по нормали в глубь раствора.

Вторая особенность заключается в том, что часто на одной и той же координатной поверхности заданы разнородные граничные условия или коэффициенты α в граничных условиях третьего рода – переменные по поверхности. Методы решения таких краевых задач рассмотрены в работе [1].

Причиной образования гальванопар на поверхности металла, погруженного в электролит, является электрохимическая гетерогенность, возникающая за счет физико-химических неоднородностей в приэлектродном слое на границе раздела фаз и на поверхности [3] (неравномерный нагрев и обтекание, концентрация механических напряжений и т.д.). Функционирование таких гальванопар приводит к возникновению трещин, свищей и язв, являющихся непосредственной причиной выхода оборудования из строя. Различного рода щели, зазоры, выпук-

лости способствуют возникновению неравномерности распределения физико-химических и гидродинамических параметров и также вызывают образование гальванопар.

Эквивалентная электрохимическая схема

Если поверхность металла, на которой расположена щель находится в напряженном состоянии, причиной электрохимической гетерогенности является концентрация напряжений вблизи щели. Плоская поверхность в этом случае – катод, а щель – анод. Если же механические напряжения невелики, то причина неоднородности заключается в неравномерной аэрации щели и плоской поверхности.

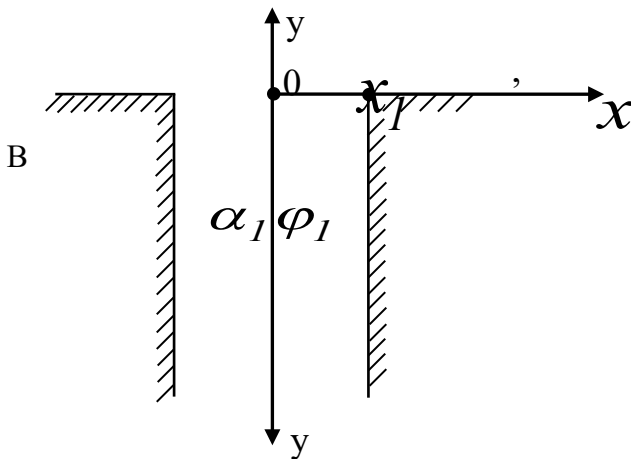


Рис.1. Система щель-плоская поверхность, погруженная в электролит

Поскольку доступ растворенного в электролите кислорода в щель затруднен, она также выступает в качестве анода по отношению к поверхности.

данной поверхности, позволяющая прогнозировать коррозионный износ этой гальванопары. Предположим, что на поверхности расположена узкая щель, ширина которой $2x_1$ во много раз меньше глубины (рис.1). Электрохимическими параметрами щели являются удельная поляризуемость металла α_1 и электрохимический (стационарный) потенциал φ_1 , характеризующий коррозионную активность металла при отсут-

ствии внешнего тока. Соответственно α_2 и φ_2 – удельная поляризуемость и электрохимический потенциал на плоской поверхности. Примем φ_2 равным нулю. Выведем одномерное дифференциальное уравнение, описывающее распределение потенциала φ по глубине трещины Y . Для этого используем уравнение баланса тока, поступающего через сечение трещины $2x_1\ell$ в точке Y , через боковую поверхность $2\ell dy$ и вытекающего через сечение трещины $2x_1\ell$ в точке $(y + dy)$

$$2x_1\ell[j(y) - j(y + dy)] = 2j_n\ell dy, \tag{1}$$

где ℓ – ширина трещины вдоль координаты Z , j_n – плотность тока через боковую поверхность. Учтем соотношение

$$j(y + dy) = j(y) + \frac{dj}{dy}dy,$$

закон Ома в дифференциальной форме

$$j = -\lambda \frac{d\varphi}{dy},$$

где λ – удельная электропроводность раствора, а также поляризационное соотношение на боковой поверхности,

$$\varphi - \alpha_1 j_n = \varphi_1, \tag{2}$$

и подставляя эти соотношения в уравнение баланса (1), получим обыкновенное дифференциальное уравнение относительно φ

$$\frac{d^2\varphi}{dy^2} - \frac{1}{x_1\alpha_1\lambda}\varphi = -\frac{\varphi_1}{x_1\alpha_1\lambda}. \tag{3}$$

Для однозначного определения потенциала, используем граничное условие у входа в трещину и условие на бесконечности

$$\frac{d\varphi(0)}{dy} = -\frac{j_0}{\lambda}, \quad \frac{d\varphi(\infty)}{dy} = 0 \quad (4)$$

Вопрос взаимодействия щели и плоскости сводится к определению плотности тока j_0 у входа в трещину. Если эта величина известна, то расчеты на плоскости и в щели могут быть проведены по отдельности, независимо друг от друга. Предположим, что j_0 известна, тогда решая краевую задачу (3), (4), получим выражение для потенциала в виде зависимости

$$\varphi(y) = A \exp\left\{-\sqrt{\frac{I}{x_1 \alpha_1 \lambda}} \cdot y\right\} + \varphi_1. \quad (5)$$

Определив неизвестную константу А из первого граничного условия (4)

$$A = \sqrt{\frac{x_1 \alpha_1}{\lambda}} \cdot j_0,$$

получим формулу

$$\varphi(y) = \sqrt{\frac{x_1 \alpha_1}{\lambda}} \cdot j_0 \exp\left\{-\sqrt{\frac{I}{\lambda \alpha_1 x_1}} \cdot y\right\} + \varphi_1, \quad (6)$$

которая у входа в трещину $y = 0$ преобразуется к виду

$$\varphi(0) - \sqrt{\frac{x_1 \alpha_1}{\lambda}} \cdot j_0 = \varphi_1. \quad (7)$$

Но из теории расчета электрохимических систем [1] известно, что если какой-либо электрод поляризуется, то на нем выполняется условие

$$\varphi(0) - \alpha^* j(0) = \varphi^*, \quad (8)$$

которое с учетом закона Ома в дифференциальной форме имеет вид

$$\varphi - \alpha^* \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \varphi^*. \quad (9)$$

Из сравнения формул (7) и (8) видно, что влияние трещины на распределение потенциала по плоскости таково, как будто у входа в трещину расположен поляризующийся электрод шириной $2x_1$, имеющий стационарный потенциал $\varphi^* = \varphi_1$

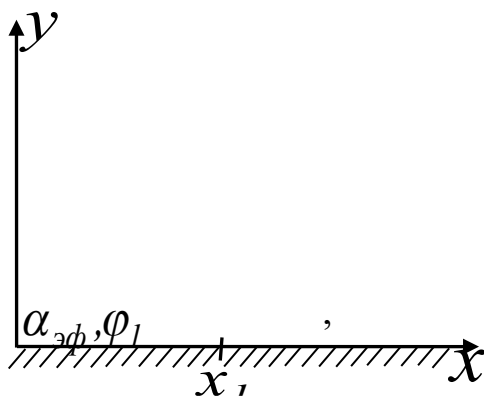


Рис.2. Эквивалентная расчетная схема

и некую эффективную удельную поляризуемость $\alpha_{эф}$

$$\alpha^* = \alpha_{эф} = \sqrt{x_1 \alpha_1 / \lambda},$$

а сама трещина отсутствует (см. рис.2). Переписав (7) с учетом закона Ома, получим выражение

$$\varphi - \sqrt{\frac{x_1 \alpha_1}{\lambda}} \cdot \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \varphi_1, \quad 0 < x < x_1, \quad y = 0,$$

выполняющее роль граничного условия третьего рода на участке поверхности $0 < x < x_1$ при расчете потенциала над плоскостью.

Совместный расчёт в трещине и на поверхности

Краевая задача расчета потенциала над плоскостью принимает вид

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad 0 < y < \infty, \quad (10)$$

$$\varphi - \alpha_{\varphi} \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \varphi_1, \quad 0 < x < x_1, \quad y = 0, \quad (11)$$

$$\varphi - \alpha_2 \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0, \quad x_1 < x < \infty, \quad y = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad 0 < y < \infty, \quad (13)$$

Приближённый метод решения задачи (10)-(13) заключается в следующем. Преобразуем граничные условия (11), (12) к виду

$$\varphi - \mu_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \begin{cases} \varphi_1 + \frac{(\mu_{\varphi} - \mu_2)}{\Delta x} \int_0^{x_1} \frac{\partial \varphi}{\partial y} dx, & 0 < x < x_1, \quad y = 0, \\ 0, & x_1 < x < \infty, \quad y = 0, \end{cases} \quad (14)$$

где приняты обозначения

$$\mu_{\varphi} = \alpha_{\varphi} \lambda, \quad \mu_2 = \alpha_2 \lambda,$$

а значение производной на участке $0 < x < x_1$ заменено ее средним значением

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} \approx \frac{1}{\Delta x} \int_0^{x_1} \frac{\partial \varphi}{\partial y} dx, \quad y = 0.$$

Точность вычислений будет тем выше, чем точнее выполняется последнее условие, учитывая малость сечения щели, можно считать данное условие выполненным. Перепишем граничное условие (14) в виде

$$\varphi - \mu_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \begin{cases} C, & 0 < x < x_1, \quad y = 0, \\ 0, & x_1 < x < \infty, \quad y = 0, \end{cases} \quad (15)$$

где константа C определяется из условия

$$C = \varphi_1 + \frac{(\mu_{\varphi} - \mu_2)}{\Delta x} \int_0^{x_1} \frac{\partial \varphi}{\partial y} dx, \quad y = 0. \quad (16)$$

Применим к дифференциальному уравнению (10) и граничному условию (15) интегральное преобразование по координате X с бесконечными пределами интегрирования. С учетом граничного условия (13) удобно применить косинус-преобразование

$$\bar{\varphi}(y) = \int_0^{\infty} \varphi(x, y) \cos(px) dx,$$

тогда краевая задача для изображения потенциала $\bar{\varphi}$ имеет вид

$$\frac{d^2 \bar{\varphi}}{dy^2} - p^2 \bar{\varphi} = 0, \quad 0 < y < \infty,$$

$$\bar{\varphi} - \mu_2 \frac{d\bar{\varphi}}{dy} = \frac{C}{p} \sin(px_1), \quad y = 0,$$

$$\bar{\varphi}(\infty) = 0.$$

Решая данную задачу, определим изображение

$$\bar{\varphi}(y) = C \frac{\sin(px_1)}{(1 + \mu_2 p) p} \exp(-py)$$

Используя далее обратное косинус-преобразование вернемся от изображения к потенциалу

$$\varphi(x, y) = \frac{2}{\pi} C \int_0^{\infty} \frac{\sin(px_1)}{(1 + \mu_2 p) p} \exp(-py) \cos(px) dp.$$

Последнее выражение позволяет рассчитать потенциал в любой точке полуплоскости над поверхностью (в том числе и на самой поверхности $y = 0$), если известна константа C . Для ее определения вычислим на границе $y = 0$ среднее значение производной на участке $0 < x < x_1$, поменяв при этом порядок интегрирования по p и по x и вычислив интеграл по x

$$\int_0^{x_1} \frac{\partial \varphi(x, 0)}{\partial y} dx = -\frac{2}{\pi} C \cdot \int_0^{\infty} \frac{\sin^2(px_1)}{(1 + \mu_2 p)p} dp .$$

Подставим далее это выражение в формулу (16) и разрешим полученное уравнение относительно C

$$C = \varphi_1 \left[1 + \frac{2(\mu_{\text{эф}} - \mu_2)}{\pi x_1} \int_0^{\infty} \frac{\sin^2(px_1)}{(1 + \mu_2 p)p} dp \right]^{-1} \quad (17)$$

В формуле (17) интеграл может быть выражен через интегральный синус $si(\beta)$ интегральный косинус $ci(\beta)$, элементарные тригонометрические функции и натуральный логарифм [4]

$$-\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin^2(px_1)}{(1 + \mu_2 p)p} dp = ci(\beta) \cos(\beta) + si(\beta) \cdot \sin(\beta) - \ln(\beta) - 0.5722 ,$$

$$ci(\beta) = \int_{\infty}^{\beta} \frac{\cos(\tau)}{\tau} d\tau , \quad si(\beta) = \int_{\infty}^{\beta} \frac{\sin(\tau)}{\tau} d\tau , \quad \beta = 2x_1 / \mu_2 .$$

Но, в соответствии с формулой (16), вычислив C , мы тем самым вычислили плотность тока j_0

$$j_0 = \frac{\lambda}{x_1} \int_0^{x_1} \frac{\partial \varphi}{\partial y} dx , \quad y = 0 , \quad j_0 = (C - \varphi_1) / (\alpha_{\text{эф}} - \alpha_2) .$$

Подставив j_0 в формулу (6) найдем распределение потенциала по глубине трещины. Используя далее поляризационное соотношение (2), вычислим распределение плотности тока по трещины, то есть определим распределение токового показателя скорости коррозии.

Пример расчёта

В качестве примера произведем прогнозирование распределения скорости коррозии в электрохимической системе из нелегированной стали, на поверхности которой имеется протяженный по координатам Y и Z зазор шириной $2x_1 = 2 \text{ см}$. Металл контактирует с морской водой, электропроводность которой $\lambda = 4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ [5]. Как правило, разность потенциалов $\Delta \varphi_1$ гальванопар, не связанных с контактом двух разнородных металлов, составляет величину порядка нескольких десятков милливольт, для определенности примем $\varphi_1 = -30 \text{ мВ}$. При этих условиях для зазора - анода $\alpha_1 = 0,025 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, для плоской поверхности - катода $\alpha_2 = 0,3 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ [6]. Расчеты показали, что эффективная поляризуемость равна $0,008 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, константа $C = 0,0154 \text{ В}$, плотность тока $j_0 \approx 0,16 \text{ А} / \text{м}^2$. Продифференцировав выражение для потенциала в трещине (формула (6)) и подставляя j_0 , определим распределение токового показателя скорости коррозии по глубине зазора

$$j = 0,16 \exp\{-31,62 \cdot y\} .$$

Результаты расчета показывают, что у входа в щель скорость коррозии составляет $0,16 \text{ А} / \text{м}^2$, это соответствует примерно $0,17 \text{ мм} / \text{год}$. Такое высокое значение скорости коррозии свидетельствует об интенсивном разрушении входа в зазор. На глубине порядка 10 см плотность тока и глубинный показатель коррозии примерно на 2 порядка ниже. Таким образом, в типичных условиях эксплуатации морской техники, боковые участки поверхности

зазора, расположенные ниже указного значения, контактной коррозии не подвержены и влияния на коррозию плоской поверхности не оказывают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иоссель Ю.Я. Математические методы расчета электрохимической коррозии и защиты металлов. Справочник / Ю.Я. Иоссель, Г.Э. Кленов. М.: Metallurgy, 1984. 272 с.
2. Коррозия и защита морских судов / И.Я. Богород, Е.В. Искра, В.А. Климов, Ю.Л. Кузьмин. Л.: Судостроение, 1973. 341 с.
3. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов / М.: Metallurgy, 1976. 569 с.
4. Прудников А.П. Интегралы и ряды. Специальные функции / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Марычев. М.: Наука, 1983. 750 с.
5. Попов Н.И. Морская вода. Справочное руководство / Н.И. Попов, К.Н. Фёдоров, В.М. Орлов. Под ред. А.С. Моница. М.: Наука, 1979. 327 с.
6. Иоссель Ю.Я. Расчет и моделирование контактной коррозии судовых конструкций / Ю.Я. Иоссель, Г.Э. Кленов, Р.А. Павловский. Л.: Судостроение, 1979. 297 с.

Минаев Евгений Николаевич –
доктор технических наук,
профессор кафедры «Физика»
Саратовского государственного
технического университета

Minaev Evgeny Nicolaevich –
Doctor of Technical Science,
Professor of the Department of « Physics»
of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 544.6.076

Е.Н. Минаев

**МЕТОД КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА,
РАСТВОРЁННОГО В ВОДНЫХ СРЕДАХ**

В работе представлен метод определения концентрации растворенного в водных растворах кислорода. Он основан на анализе процесса нестационарной диффузии кислорода к катоду электрохимического датчика. Метод может быть использован при контроле качества водоподготовки в теплоэнергетике, при экологическом мониторинге окружающей водной среды, а также в лабораторных исследованиях при определении коэффициента диффузии

Растворённый кислород, нестационарная диффузия, метод контроля

E.N. Minaev

**METHOD FOR CONTROL OF OXYGEN,
DISSOLVED IN THE AQUEOUS SOLUTIONS**

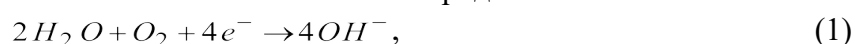
Method for determining the concentration of oxygen dissolved in the aqueous solutions presents in this paper. It is based at the analysis of the process of the nonstationary diffusion of oxygen to the cathode of electrochemical transducer. Method can be used for quality control of water treatment in the

heat-power engineering, for ecological monitoring of aqueous environment, and also in the laboratory investigations with the determination of the diffusion coefficient

Dissolved oxygen, nonstationary diffusion, method of the control

Методы определения концентрации молекулярного кислорода, растворенного в водных растворах, применяются при контроле качества водоподготовки в теплоэнергетике и других областях техники, использующих теплообменное оборудование, а также при экологическом мониторинге окружающей водной среды.

Наибольшее распространение получил электродиффузионный (электрохимический) метод контроля, при котором через проточную электрохимическую ячейку, заполненную исследуемым раствором, пропускают постоянный электрический ток. На катоде при этом происходит реакция электрохимического восстановления кислорода



с его поглощением [1]. В глубине раствора подвод кислорода осуществляется вынужденной конвекцией, в прикатодном диффузионном слое – диффузией. На поверхности катода концентрация кислорода меньше, чем в глубине раствора, поэтому возникает градиент концентрации по нормали к катоду, и поток его равен j_m

$$j_m = D \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (2)$$

или приближенно

$$j_m = D \frac{C_0 - C_k}{\delta}, \quad (3)$$

где D – коэффициент диффузии, δ – толщина диффузионного слоя, C_0 – концентрация кислорода в глубине жидкости, C_k – концентрация его у поверхности катода. Если устанавливается такой ток, для поддержания которого требуется весь кислород приэлектродного слоя, то $C_k = 0$ и

$$j_m = \frac{D}{\delta} C_0. \quad (4)$$

В этом случае возникает режим предельного диффузионного тока, электрический ток будет равен

$$I_\alpha = nFD \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} S, \quad (5)$$

или приближенно

$$I_\alpha = KC_0, \quad \text{где} \quad K = \frac{nFDS}{\delta}, \quad (6)$$

n – число электронов участвующих в реакции, F – константа Фарадея, S – площадь катода. Измерив значение тока I_α , можно определить искомую концентрацию C_0 . Все вышесказанное относится к случаю стационарной диффузии, когда поток исследуемой жидкости стабилизирован в датчике, толщина диффузионного слоя и предельный диффузионный ток постоянны.

Основные затруднения в применении данного метода связаны с необходимостью обеспечить постоянство коэффициента пропорциональности K в формуле (6). При рассмотрении диффузионного слоя δ нужно отметить [2], что он является частью гидродинамического пограничного слоя δ_g , причем

$$\frac{\delta}{\delta_g} \approx \left(\frac{D}{\nu} \right)^{\frac{1}{3}},$$

V – кинематический коэффициент вязкости. Сам гидродинамический слой зависит от расстояния X между рассматриваемой точкой электрода и точкой набегания потока жидкости, а также от скорости в ядре потока v_0 ,

$$\delta_g = \sqrt{\frac{v_x}{v_0}}.$$

Следовательно, коэффициент пропорциональности K равен

$$K = nFD^{\frac{2}{3}}v_0^{\frac{1}{6}}v_x^{\frac{-1}{6}}x^{\frac{-1}{2}}S.$$

Но величины входящие в этот коэффициент зависят от колебаний температуры, давления, состава раствора, степени шероховатости поверхности, скорости потока жидкости и т.д. Следовательно, коэффициент пропорциональности также может изменяться, а это приведёт к неоднозначности в определении концентрации кислорода. Для обеспечения постоянства данного коэффициента используют технически сложные кислородомеры с газопередающей системой, а рабочую поверхность катода покрывают специальной пленкой. При этом возникают свои технические проблемы [3].

Данных затруднений можно избежать, если рассматривать процесс нестационарной диффузии, когда жидкость внутри датчика неподвижна, а перенос кислорода осуществляется диффузией не только в диффузионном пограничном слое, но и во всем объеме. При этом, само понятие диффузионного слоя вряд ли применимо, скорее можно говорить о диффузионном фронте постепенно распространяющемся вглубь раствора. Поскольку процесс нестационарен, предельный диффузионный ток I_α изменяется во времени. Сущность предполагаемого подхода заключается в том, чтобы сформулировать краевую задачу нестационарной диффузии и, решая ее, найти расчётный вид зависимости тока от времени, причем искомая концентрация кислорода C_0 будет являться параметром этой зависимости. Далее проводят измерения и сравнивают экспериментальную зависимость с расчётной. Из сравнения находят C_0 .

На начальном этапе толщина объема, вовлеченного в процесс диффузии, мала, диффузионный фронт медленно распространяется от катода к аноду. Для постановки математической задачи важно знать: при каких условиях нужно считать анод расположенным на бесконечном расстоянии от катода? Ответ на этот вопрос зависит от того, на какое расстояние распространится диффузионный фронт за выбранный промежуток времени t^* . Из соображений удобства проведения измерений, выберем промежуток времени между началом диффузии (подачей напряжения на электроды) и началом измерений $t^* = 100$ секунд. Если за это время процесс диффузии распространится на расстояние много меньшее, чем расстояние до анода, то анод следует считать расположенным на бесконечности. Так как коэффициент диффузии имеет размерность $[D] = \text{мм}^2/\text{с}$, его можно представить в виде

$$[D] = [l^*]^2 / [t^*],$$

где l^* – характерный размер. При 25°C коэффициент диффузии кислорода в воде равен $2,6 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$, тогда $l^* = 0,5 \text{ мм}$ [4]. Если расстояние существенно больше, то координата X , направленная по нормали от катода в глубину раствора изменяется в интервале $0 < x < \infty$.

Обычно в кислородомерах напряжение на электроды подается потенциостатическим способом так, чтобы напряжение не изменялось, как бы не изменялось внутреннее электрическое сопротивление электрохимической ячейки. Кроме того, величина подаваемого напряжения должна сразу же после включения обеспечить режим предельного диффузионного тока. Тогда весь подводимый кислород без остатка расходуется в реакции (1). Поэтому его концентрация на катоде, где $x = 0$, равна нулю в любой момент времени

$$C(x, t) = 0, \quad x = 0, \quad t > 0. \quad (7)$$

При математической постановке задачи, соотношение (7) играет роль граничного условия. Кроме того, выполняется начальное условие

$$C(x, t) = C_0, \quad t = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad (8)$$

которое означает, что в момент включения и до него кислород равномерно распределен по объему с исходной концентрацией C_0 .

Рассмотрим плоский протяженный катод, расположенный на значительном удалении от анода. Тогда дифференциальное уравнение нестационарной диффузии имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x < \infty, \quad t > 0 \quad (9)$$

Решение этого уравнения с учетом условий (7), (8) известно.

$$C(x,t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} C_0 \int_0^M e^{-\mu^2} d\mu, \quad M = x/(2\sqrt{Dt}) \quad (10)$$

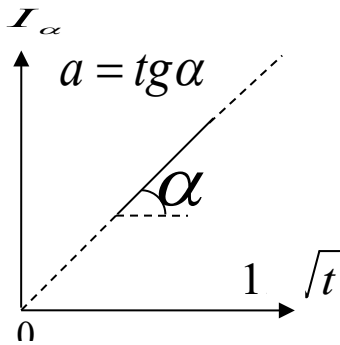


Рис.1. Зависимость тока от времени

Используя формулу для расчета предельного диффузионного тока (5), найдем

$$I_\alpha = a \frac{1}{\sqrt{t}}, \quad \text{где} \quad a = \frac{nFS}{\sqrt{\pi}} (\sqrt{D} C_0) \quad (11)$$

Если по оси абсцисс откладывать $1/\sqrt{t}$, то получим прямую, проходящую через начало координат (рис.1). Измеряя данную зависимость и подставляя экспериментально полученное значение a в формулу (11), найдем C_0

$$C_0 = \frac{\sqrt{\pi}}{nFS\sqrt{D}} a, \quad (12)$$

Существенным недостатком рассмотренной ячейки и расчетной схемы (7)-(9) является необходимость использования значения коэффициента диффузии, а оно, как правило, точно не известно.

Рассмотрим катод в виде сферы радиусом R , анод, по-прежнему, будем считать расположенным на бесконечности. Краевая задача в этом случае имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right), \quad R \leq r < \infty, \quad t \geq 0 \quad (13)$$

$$C(r,t) = 0, \quad r = R, \quad t \geq 0 \quad (14)$$

$$C(r,t) = C_0, \quad t = 0, \quad R \leq r < \infty \quad (15)$$

Учтем, что уравнение (13) эквивалентно уравнению

$$\frac{\partial [rC]}{\partial t} = D \frac{\partial^2 [rC]}{\partial r^2}, \quad (16)$$

решая последнее методом интегрального преобразования Лапласа, получим

$$C(r,t) = C_0 - \frac{R}{r} C_0 \left\{ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^M e^{-\mu^2} d\mu \right\}, \quad M = (r-R)/(2\sqrt{Dt}). \quad (17)$$

Вычислим зависимость предельного диффузионного тока от времени по формуле (5)

$$I_\alpha = a \frac{1}{\sqrt{t}} + b, \quad (18)$$

где коэффициенты a и b соответственно равны

$$a = \frac{nFS}{\sqrt{\pi}} (\sqrt{D} C_0), \quad b = \frac{nFS}{R} (DC_0) \quad (19)$$

В отличие от предыдущего случая, график этой зависимости пересекает ось ординат не в нулевой точке, а в точке b (рис. 2).

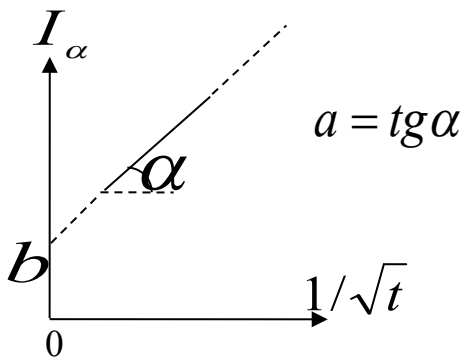


Рис.2. Зависимость тока от времени для сферического датчика

Измеряя зависимость, определяя экспериментальные значения a и b и подставляя их в формулы (19), вычислим сразу в одном эксперименте коэффициент диффузии кислорода и концентрацию C_0 .

$$C_0 = \frac{\pi}{4EDC} \left(\frac{a^2}{l}\right), \quad (20)$$

$$D = \frac{R^2}{4} \left(\frac{b}{a}\right)^2. \quad (21)$$

Одним из недостатков расчетной схемы (13)-(15) является медленное (по закону $1/\sqrt{t}$) изменение тока во времени. Для

удобства использования метода на практике, время измерений не должно превышать нескольких минут, чем быстрее изменяется ток, тем точнее определяется C_0 . Еще один недостаток связан с тем, что раствор в электрохимическом датчике занимает больший объем, и, вследствие некоторых трудно контролируемых причин, таких как случайные вибрации, колебания температуры в разных точках объеме и т.д., могут возникать локальные конвективные потоки жидкости, нарушающие процесс диффузии.

Рассмотрим датчик, состоящий из катодной и анодной полостей, заполненных жидкостью. Катодная полость представляет собой цилиндр с малой высотой (порядка 1 мм) и основаниями радиусом несколько сантиметров. Одним из оснований является металлический катод, другое – выполнено из инертного материала, например из органического стекла. Этот материал не поглощает и не выделяет кислорода, кроме того, он является электроизолятором. В центре основания из оргстекла расположено малое отверстие диаметром порядка 1 мм. Electrodes замыкаются по внутреннему участку цепи через измерительную схему, по внешнему – через электропроводный раствор в анодной, катодной полостях и через раствор внутри этого малого отверстия. Пустота анода может иметь любую форму, при условии, что площадь его должна быть много больше площади катода. Это условие позволяет пренебречь электрическим сопротивлением в приэлектродном слое анода по сравнению с катодом. В катодной полости на границе инертного материала и жидкости выполняется граничное условие

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial x} = 0, \quad x=l, \quad t > 0, \quad (22)$$

которое означает, что инертный материал не выделяет и не поглощает кислорода. Запишем краевую задачу для катодной полости:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x < l, \quad t > 0, \quad (23)$$

$$C(x,t) = 0, \quad x = 0, \quad t > 0, \quad (24)$$

$$C(x,t) = C_0, \quad t = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad (25)$$

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial x} = 0, \quad x=l, \quad t > 0, \quad (26)$$

Решая данную краевую задачу методом разделения переменных, найдем зависимость концентрации от координаты по времени

$$C(x,t) = \frac{4C_0}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)} \sin\left(\frac{(2k+1)\pi}{2l}x\right) \exp\left\{-\frac{D(2k+1)^2\pi^2}{4l^2}t\right\} \quad (27)$$

Вычислим производную на катоде ($x = 0$)

$$\frac{\partial C(0,t)}{\partial x} = \frac{2C_0}{l} \sum_{k=0}^{\infty} \exp\left\{-\frac{D(2k+1)^2 \pi^2}{4l^2} t\right\}, \quad (28)$$

и оценим скорость сходимости этого ряда при $l = 1 \text{ мм}$; $D = 2.6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$; $t = 100 \text{ с}$. Расчет показывает, что второй член ряда составляет 0.6% от первого, остальные члены ряда пренебрежительно малые величины. При увеличении времени, скорость сходимости только увеличивается. Таким образом, можно ограничиться только первым членом ряда. Используем формулу (5), рассчитаем зависимость предельного диффузионного тока от времени (учтено $n=4$)

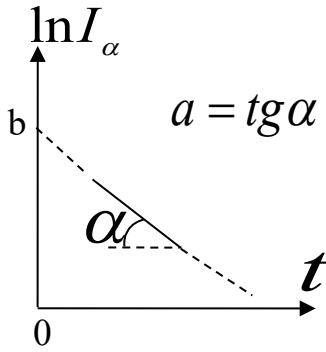


Рис.3. Зависимость тока в катодной полости от времени

$$I_{\alpha} = \frac{8FDSC_0}{l} \exp\left\{-\frac{D\pi^2}{4l^2} t\right\}. \quad (29)$$

В полулогарифмических координатах она имеет вид прямой (рис. 3)

$$\ln I_{\alpha} = b - at, \quad (30)$$

где константы a и b определяются по формулам:

$$a = \frac{D\pi^2}{4l^2}, \quad b = \ln\left(\frac{8FDC_0S}{l}\right). \quad (31)$$

Измерив участок данной зависимости, находим в эксперименте a и b , подставляем их в формулы (31), определяем концентрацию

кислорода и коэффициент диффузии.

Сравнение расчетной схемы (23)-(26) со схемой (13)-(15) (сферический катод) показывает более высокую скорость изменения тока I_{α} , а это повышает точность определения концентрации кислорода. Кроме того, поперечный размер катодной полости l равен величине порядка 1 мм, а при таком размере начинают сказываться силы поверхностного натяжения, поэтому возникновение локальных конвективных потоков жидкости менее вероятно.

При практическом использовании данного метода нет необходимости измерять весь участок зависимости (рис. 3). Достаточно измерить I_{α} при двух значениях времени и подставить их в выражение (29)

$$\begin{cases} I_{\alpha,1} = \frac{8FDSC_0}{l} \exp\left\{-\frac{D\pi^2}{4l^2} t_1\right\} \\ I_{\alpha,2} = \frac{8FDSC_0}{l} \exp\left\{-\frac{D\pi^2}{4l^2} t_2\right\} \end{cases}$$

Разрешая данную систему относительно неизвестных D и C_0 получим

$$D = \frac{4l^2}{\pi^2} \cdot \frac{\ln(I_{\alpha,1}/I_{\alpha,2})}{t_1} \quad (32)$$

$$C_0 = \frac{\pi^2}{32FSl} \cdot \frac{t_1}{\ln(I_{\alpha,1}/I_{\alpha,2})} \cdot \frac{I_{\alpha,1}^2}{I_{\alpha,2}} \quad (33)$$

При выводе данных формул предположили $t_2 = 2t_1$.

Таким образом, предложенный метод заключается в следующем: 1) потенциостатически подают в катодную полость напряжение, при котором ток принимает предельное значение, 2) через промежутки времени t_1 и $t_2 = 2t_1$ после включения измерительной схемы определяют ток $I_{\alpha,1}$ и $I_{\alpha,2}$, 3) подставляют измеренные значения тока в формулу (33), находят концентрацию C_0 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Скорчеллетти В.В. Теоретическая электрохимия / В.В. Скорчеллетти. Л.: Химия, 1974. 658 с.
2. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич М.: Изд-во АН СССР, 1958. 495 с.
3. Альперин В.З. Современные электрохимические методы и аппаратура для анализа газов в жидкостях и газовых смесях / В.З. Альперин, Э.И. Конник, А.А. Кузьмин. М.: Химия, 1985. 182 с.
4. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мелихова. М.: Энергоиздат, 1991. 658 с.

Минаев Евгений Николаевич –
доктор технических наук,
профессор кафедры «Физика»
Саратовского государственного
технического университета

Minaev Evgeny Nicolaevich –
Doctor of Technical Science,
Professor of the Department of « Physics»
of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 616.3:621.7+621.9; 616.31; 534.29

В.Н. Лясников, В.А. Протасова, Е.Ю. Пошивалова

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВНУТРИКОСТНЫХ ИМПЛАНТАТОВ

Процент приживляемости современных денальных имплантатов составляет 92-98 %, что является хорошим результатом. Но проблема отторжения имплантатов костной с тканью пациента на ранних и поздних сроках по-прежнему существует. Данная статья посвящена разработке и исследованию новых подходов к созданию высокоэффективных денальных имплантатов с применением современных электрофизических технологий.

Денальные имплантаты, электрофизические технологии, гидроксипатит кальция, наноструктуры

V.N. Lyasnikov, V.A. Protasova, E.Y. Poshivalova

MODERN MATERIALS AND TECHNOLOGY IN THE MANUFACTURE OF ENDOSSEOUS IMPLANTS

The percent of engraftment of modern dental implants makes 93-98% that is a good result. But the problem of a seizure of implants a bone tissue of the patient on early and late periods still exists. This article proposes the design and research of new approaches to creation highly effective dental implants with application of modern electro physical technigues.

Dental implants, electro physical technigue, calcium hydroxyapatite, Nanostructures

Потребность в использовании внутрикостных имплантатов в настоящее время достаточно велика [1-4]. Сложность создания адекватных искусственных элементов и систем (включая и зубо-челюстную систему и опорно-двигательный аппарат) требует использования новейших методов и технологий их производства, а также высокоэффективных методов моделирования и анализа высококачественных материалов и покрытий [5-8]. Как правило, такие материалы и покрытия, а также изготовленные из них системы должны сочетать в себе определенные свойства живой и неживой ткани, которые полностью или частично выполняли бы функции утраченных органов [1,6,8].

В этой связи в медицинской практике широко применяются биоактивные керамические покрытия на основе гидроксиапатита напыленных на поверхность имплантируемых металлических конструкций и систем [1,10].

Исходя из этого наиболее приемлемым способом решения проблемы отторжения внутрикостных имплантатов и их высокого срока службы является формирование на поверхности имплантата специального наноструктурированного слоя. Причем, этот слой должен обладать определенной пористой структурой, морфологией поверхности, адгезионно-когезионными и другими свойствами, благодаря которым данная конструкция по функциональным и эксплуатационным характеристикам максимально приближалась бы к натуральному органу [11].

Используя технологию электроплазменного напыления пористо-порошковых биоактивных гидроксиапатитовых и титановых покрытий в виде системы наноструктурированных слоев удалось получить высококачественные внутрикостные имплантаты.

Результаты исследования структурно-морфологических свойств поверхностных слоев плазмонанпыленных покрытий приведены на рис. 1-3.

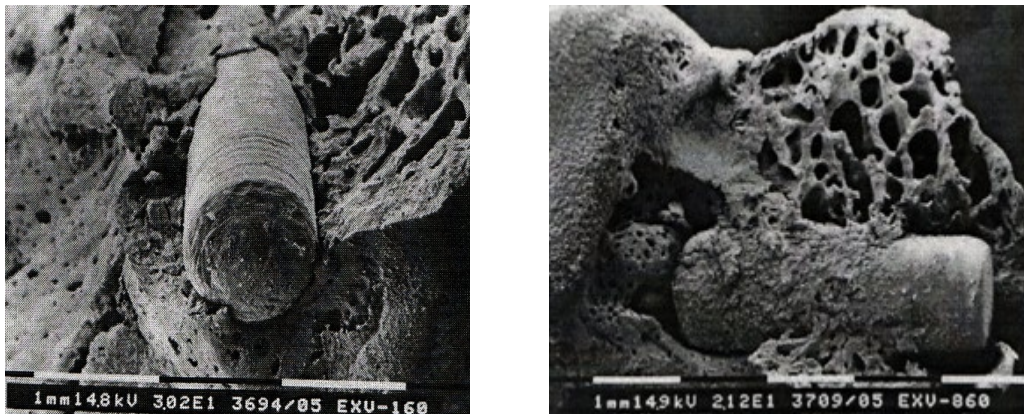


Рис. 1. Интеграция механически обработанных имплантатов

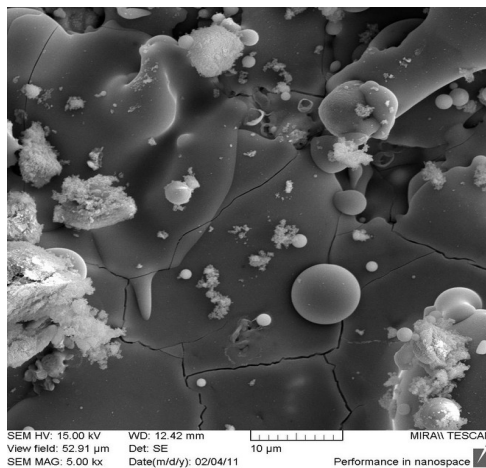


Рис. 2. Морфология поверхности гидроксиапатитового покрытия

Главным признаком остеоинтеграции является заполнение пространства между инфраструктурой покрытия и контактирующей с ним живой тканью.

Важным моментом здесь является остаточный диаметр пор, в противном случае в них не будут прорастать кровеносные сосуды.

При плазменном напылении гидроксиапатита биоактивное покрытие на внутрикостном имплантате формируется в основном из расплавленных частиц с различным грануломет-

рическим составом (например: 40-70 мкм). Более мелкие частицы (при выбранном технологическом режиме напыления – ток дуги, дистанция напыления, температурный режим напыляемого изделия и т.д.) полностью проплавляются в плазменной струе и хорошо растекаются по специально подготовленной подложке. В тоже время крупные частицы в плазменном потоке расплавляются не полностью и поэтому формируется покрытие достаточно сложной структуры (рис. 3).

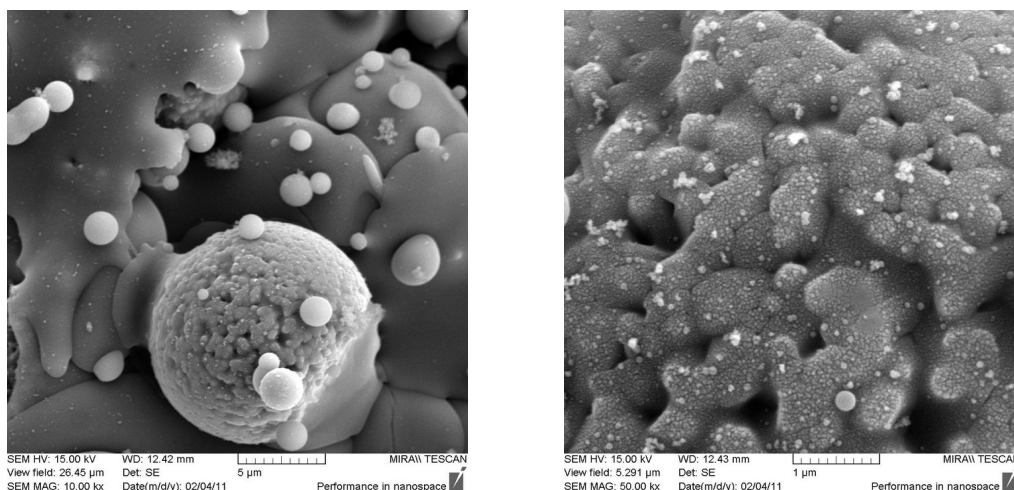


Рис. 3. Морфология поверхности гидроксиапатитовых покрытий

В этой связи при необходимости получения более равномерного морфологического состояния поверхности используют напыляемые порошки с узким дисперсионным составом, например, 40÷45 мкм или 50÷60 мкм и др.).

Для повышения качественных показателей биокерамических покрытий используют дополнительное воздействие ультразвуком, лазерным облучением на поток напыляемых частиц и на уже напыленное покрытие.

Было также установлено, что при формировании биокерамических покрытий на поверхности из гидроксиапатита при определенных технологических режимах появляются наноструктурированные зоны в основном в дефектных областях подложки. Механизмы образования таких наноструктурированных зон пока до конца не ясны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun L. Material Fundamentals and Clinical Performance of Plasma-Sprayed Hydroxyapatite Coatings: A Review / L. Sun, C.C.Berndt, K.A.Gross, A.Kucuk // J. Biomed. Mater. Res. (Appl. Biomater.). 2001. Vol. 58. P.570-592.
2. Лясникова А.В. Стоматологические имплантаты. Исследование, разработка, производство, клиническое применение / А.В. Лясникова, А.В. Лепилин, Н.В. Бекренев, Д.С. Дмитриенко. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 254 с.
3. Vallet-Regi M. Calcium Phosphates as Substitution of Bone Tissues / M.Vallet-Regi, J.M.Gonzalez-Calbet // Progress Solid State Chem. 2004. Vol. 32. P.1-31.
4. Epinette J.A., Geesink R.G. Hydroxyapatite Coated Hip and Knee Arthroplasty. Amsterdam: Elsevier, 1995. 394 p.
5. LeGeros R.Z. Calcium Phosphate Bioceramics: Past, Present and Future / R.Z.LeGeros, J.P.LeGeros // Key Eng. Materials. 2003. Vol. 240-242. P.3-10.
6. Электроплазменное напыление в производстве внутрикостных имплантатов / К.Г. Бутовский, А.В. Лясникова, А.В. Лепилин, Р.В. Пенкин, В.Н. Лясников. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 200 с.

7. Калита В.И. Физика и химия формирования биоинертных и биоактивных поверхностей на имплантатах. Обзор / В.И. Калита // Физика и химия обработки материалов. 2000. №5. С. 28-45.

8. Данильченко С.Н. Структура и свойства апатитов кальция с точки зрения биоминералогии и биоматериаловедения. Обзор / С.Н. Данильченко // Вісник СумДУ. Серія «Фізика, математика, мехатка». 2007. №2. С. 33-59.

9. Duguay N. Biomaterials and osseous regeneration / N.Duguay, A.Petite, E. Arnaud // Ann. Chir. Plast. Esther. 2000. Vol. 45. №3. P.364-376.

10. Лясников В.Н., Протасова Н.В. Плазменное напыление в электронике и биомедицинской технике: учеб. пособие / В.Н. Лясников, Н.В. Протасова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. 285 с.

11. Мельникова И.П. Нанообъекты, свойства и применение, методы изготовления и анализ наноструктур / И.П. Мельникова, Б.А. Маренко, В.Н. Лясников. Саратов. СГТУ, 2010. 256 с.

Лясников Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физическое материаловедение и технология новых материалов», Саратовского государственного технического университета

Протасова Валентина Александровна – студентка 3 курса специальности «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»

Пошивалова Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физическое материаловедение и технология новых материалов» Саратовского государственного технического университета

Lyasnikov Vladimir Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor Head of sub-department «Materials Science and technology of new materials», of Saratov State Technical University

Protasova Valentina Aleksandrovna – 3rd year student of sub-department «Biotech and Medical Devices and Systems»

Poshivalova Elena Yurevna – Ph.D., Assistent of Professor of sub-department «Materials Science and technology of new material» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.794.61

А.А. Фомин, И.В. Родионов, Н.В. Петрова, А.М. Захаревич

МОДИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОКСИДНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ ПОВЕРХНОСТИ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

В статье описано применение индукционно-термической обработки малогабаритных изделий из стали 12Х18Н10Т, используемых в медицине, в частности, ортопедии. Данным способом на поверхности стали 12Х18Н10Т формируются биосовместимые металлооксидные пленки и покрытия, характеризующиеся развитой морфологией субмикрометровой структуры, а также твердостью не менее $9,55 \pm 4,45$ ГПа.

Индукционно-термическая обработка, металлооксидное покрытие,
наноиндентирование

A.A. Fomin, I.V. Rodionov, N.V. Petrova, A.M. Zakharevich

SURFACE MODIFICATION WITH METAL OXIDE COMPOSITIONS ON 12X18H10T STEEL MEDICAL ITEMS USING HIGH FREQUENCY CURRENT

The article describes thermal induction treatment application for small 12X18H10T steel items used in medicine, especially in orthopedics. This method enables to form biocompatible metal oxide films and coatings on 12X18H10T steel surface having developed morphology of submicrometric structure and hardness of at least $9,55 \pm 4,45$ GPa.

Thermal induction treatment, metal oxide coating, nanoindentation

Введение

В травматологии и ортопедии металлы, в основном нержавеющие хромоникелевые стали, широко используются при изготовлении хирургических инструментов, различных конструкций ортопедических и внутрикостных систем [1]. Поверхность внутрикостных медико-технических изделий должна обладать специальным набором физико-химических и биомеханических характеристик. Металлическая основа обеспечивает сопротивление механическим нагрузкам распределенного типа, однако при их установке, например с натягом в подготовленное костное ложе, возникают срезающие усилия. В данных экстремальных условиях главными характеристиками поверхностного слоя являются твердость и износостойкость. Биосовместимое покрытие должно также иметь высокие показатели шероховатости, открытой пористости, развитую морфологию субмикрометровой и нанометровой структуры [2, 3].

Обычно такая модификация поверхности производится газотермическими, вакуумно-конденсационными или физико-химическими методами осаждения и оксидированием. Основной характеристикой данных методов является значительная энергоемкость, необходимость использования сложной технологической последовательности, дорогостоящих материалов, относительно большая длительность процесса получения оксидного слоя, сниженная механическая прочность и трещиностойкость при высоких значениях пористости, а также ограниченность или отсутствие возможности получения наноструктурного состояния. В связи с вышеуказанной целью исследования является разработка технологии формирования биосовместимых пленок и покрытий с развитой морфологией в сочетании с высокой твердостью за счет обработки токами высокой частоты основного металла малогабаритных медицинских изделий.

Методика эксперимента

Образцы представляют собой пластины хромоникелевой стали 12X18H10T толщиной 2 мм, поверхность которых подвергается пескоструйной обработке корундовым абразивом и очистке в ультразвуковой ванне. Поверхность подготовленных образцов модифицируется металлооксидными соединениями в воздушной среде. При этом устанавливается влияние индукционно-термической обработки (ИТО) металлической основы в диапазоне температуры 800...1200 °С на показатели микроструктуры получаемых пленок и покрытий. Образцам покрытий присваивается двузначная нумерация, первая цифра обозначает величину температуры обработки, а вторая – длительность процесса, измеряемую в минутах.

Методы исследования структурного состояния и механических свойств образцов предусматривали использование растровой электронной микроскопии (РЭМ; MIRA II LMU, Tescan) в сочетании с энергодисперсионным рентгенфлуоресцентным анализом (ЭДРФА;

INCA PentaFETx3, OXFORD Instruments) и наноиндентирование (NANOVEA). Проверка биосовместимости проводилась *in vitro* на фибробластах человека в соответствии с методикой культивирования, используемой в отделе клеточной инженерии образовательного института наноструктур и биосистем СГУ им. Н.Г. Чернышевского.

Результаты исследования и их анализ

Результаты РЭМ поверхности образцов показали наличие металлооксидных тонких покрытий (рис. 1).

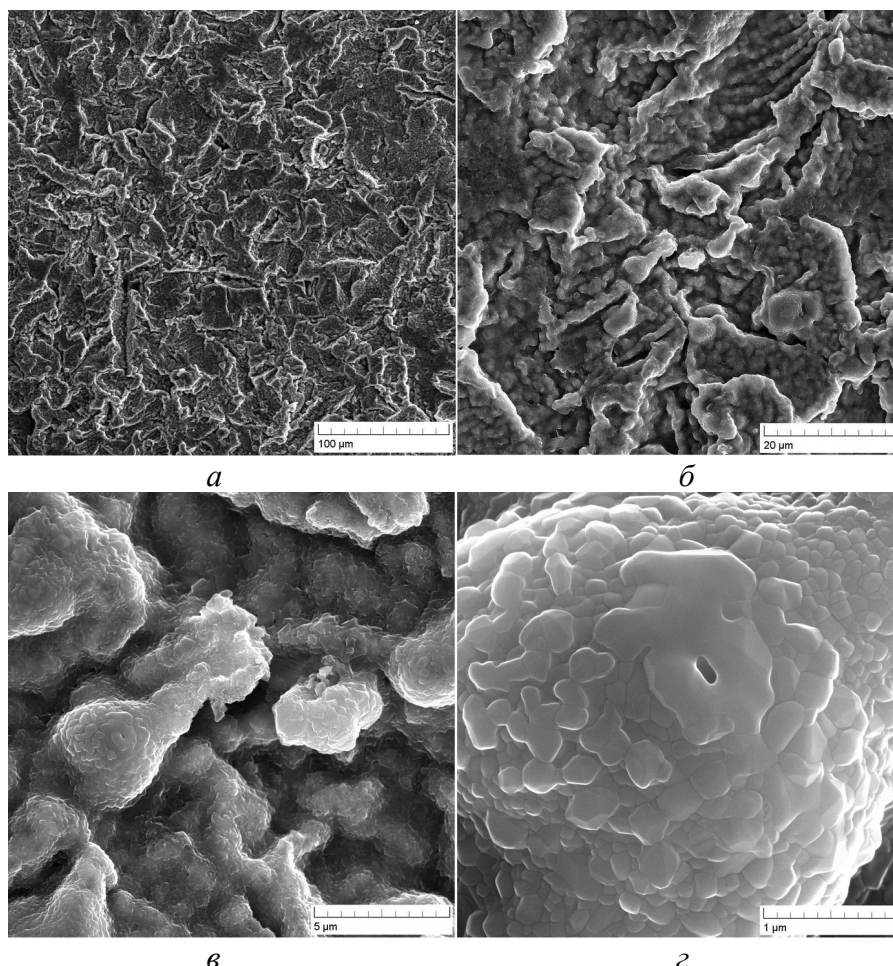


Рис. 1. Морфология металлооксидного покрытия, полученного при режиме ИТО 800-3

Микроструктура поверхности представляет собой рельеф исходной металлической основы после пескоструйной обработки (рис. 1 а, 1 б). Более детальное исследование в субмикрометровом масштабе позволяет выявить тонкую структуру, представленную округлыми зернами и мельчайшими порами (рис. 1 в, 1 г). При режиме ИТО 800-3 на выступах формируются зерна средним размером 180...450 нм, а во впадинах – 80...150 нм. Режим ИТО при температуре 1200 °С (1200-2 и 1200-5) характеризуется более рыхлой и шероховатой структурой.

Методом ЭДРФА выявляется химический состав образцов, полученных на оптимальных режимах, основными компонентами сформированного металлооксидного тонкого покрытия являются никель (42...67 %), хром (29...37 %) и кислород (18...19 %). Присутствуют также примеси марганца (1,2...3,4 %), железа (0,52...0,95 %) и следы титана, кремния, алюминия общим содержанием менее 1,5 %.

Твердость в нанометровом масштабе исследования характеризуется двукратным возрастанием нанотвердости до $9,55 \pm 4,45$ ГПа (ИТО 800-3) по сравнению с показателями для металлической основы после пескоструйной обработки – $4,07 \pm 2,03$ ГПа. При ИТО 1200-3 нанотвердость, напротив, резко снижается и составляет $1,32 \pm 0,31$ ГПа, что в 2...3 раза превышает нанотвердость компактной костной ткани человека. Модуль упругости образцов покрытий также возрастает вдвое до $201,63 \pm 37,68$ ГПа в сравнении со сталью 12Х18Н10Т – $E = 112,90 \pm 29,03$ ГПа. ИТО образцов при режиме 1200-3 характеризуется значением $E = 62,55 \pm 12,24$ ГПа.

Проверка биосовместимости *in vitro* получаемых образцов покрытий показала, что высокая морфологическая гетерогенность поверхностной структуры позволяет обеспечить стабильное закрепление клеток фибробластов (рис. 2).

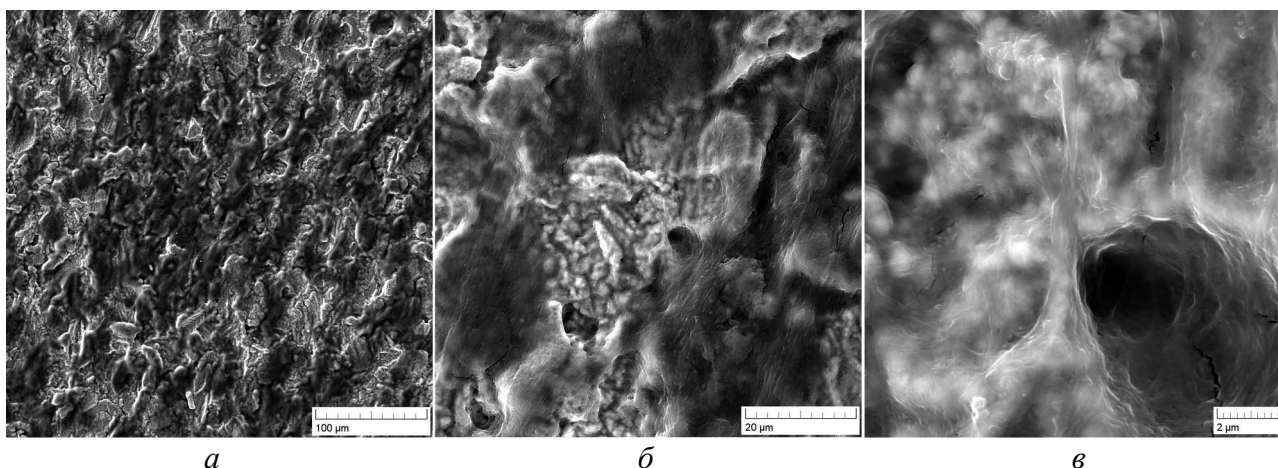


Рис. 2. Морфология поверхности образца покрытия, полученного при режиме ИТО 1000-3, после теста *in vitro* в течение 2 недель

На представленных изображениях РЭМ клетки показаны темными диффузно рассеивающими объектами. Прикрепление клеток происходит наиболее активно в присутствии субмикрометровых и нанометровых структур, при этом развитая морфология покрытий, полученных при ИТО 800...1000 °С, активно стимулирует процесс биоинтеграции (рис. 2 б, 2 в). При ИТО свыше указанного диапазона происходит резкое снижение биологической активности и проявляется угнетение процессов роста и деления клеток.

Выводы

Технология ИТО малогабаритных медицинских изделий обеспечивает ускоренное модифицирование их поверхностного слоя металлооксидными соединениями. Результаты исследования и анализ влияния режимов ИТО на морфологию служат основанием для разработки технологических рекомендаций по модификации поверхности медико-технических изделий из стали 12Х18Н10Т, например остеофиксаторов. Установлено, что тонкое металлооксидное покрытие с субмикрометровыми и нанометровыми зёрнами и порами, формируемое при нагреве от 800 до 1000 °С и выдержке не менее 3 минут, характеризуется высокой биосовместимостью и твердостью.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, соглашение № 14.В37.21.0571.

ЛИТЕРАТУРА

1. Paital S.R. Calcium phosphate coatings for bio-implant applications: Materials, performance factors, and methodologies / S.R.Paital, N.B.Dahotre // Materials Science and Engineering R, 2009. No. 66. pp. 1–70.
2. Catledge S.A. Nanostructured surface modifications for biomedical implants / S.A. Catledge, M.Fries, Y.K.Vohra // Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. Vol. 10. pp. 1–22.
3. Fomin A.A. et al. Nanocrystalline structure of the surface layer of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings obtained upon preliminary induction heat treatment of metal base // Technical Physics Letters, 2012. Vol. 38. No. 5. pp. 481–483.

Фомин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, Саратовского государственного технического университета

Fomin Aleksandr Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Saratov State Technical University

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, Саратовского государственного технического университета

Rodionov Igor Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Saratov State Technical University

Петрова Наталия Владимировна – младший научный сотрудник, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (СГУ), Образовательно-научный институт наноструктур и биосистем (ОНИ), отдел клеточной инженерии
Захаревич Андрей Михайлович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией диагностики наноматериалов и структур ОНИ, СГУ

Petrova Natalia Vladimirovna – Junior Researcher, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky (SSU), Educational Scientific Institute of Nanostructures and Biosystems, Department of Cell Engineering

Zakharevich Andrey Mikhailovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Laboratory Chief, SSU, Educational Scientific Institute of Nanostructures and Biosystems, Laboratory of Nanomaterials and Structures Diagnostics

Статья поступила в редакцию 13.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ

УДК 781.1

К.О. Чепеленко

ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО ИСКУССТВА

Основная направленность данной работы связана с поиском путей теоретического и методологического обоснования концепта <пространство искусства>. Дана вербализация лексемы <пространство>, рассматриваются релевантные характеристики универсальной категории пространства, такие как структурированность, движение; прослеживается связь категорий <пространство> и <искусство>, <пространство> и <время>; предпринята попытка построения топологического пространства искусства.

Пространство, системная целостность, топологически структурированное пространство искусства

K.O. Tchepelenko

THE TOPOLOGICAL STRUCTURED SPACE OF ART

The fundamental tendency this article is connected with is the search of ways of theoretical and methodological grounds of the concept <space of art>; the verbalization of lexeme <space>, is given, the relevant characteristics of universal category of <space>, such as structure, movement are considered communication categories <space> and <art>, <space> and <time> are studied; an attempt to construct the topological space of art. is undertaken.

Space, system integrity, the topological structured space of art

Пространственный подход, сформировавшийся на базе абстрактной категории, не имеющей денотата, широко распространен в современной науке. Многообразием коннотаций терминов <пространство> и <пространственность>, обусловлено их применение в различных аспектах научно-технического и художественно-эстетического освоения мира. Современные исследовательские концепции все чаще «строятся», «разворачиваются» в виде пространственных построений, структур; методологическими ресурсами активно «осваиваются» топологические модели, пространственные концепты; пространство проблематизи-

руется как контекст социальных взаимодействий и как их своеобразная арена [1], пространственность рассматривается как культурный код современности.

Искусство – системная целостность, предстающая в совокупности материально-производственных, научных, духовных, общественных компонентов. В качестве научной репрезентации этой системы задумана концепция <пространства искусства>, методологическим основанием которой являются интегрирующие и системообразующие концепты. Понятийно-терминологический тезаурус работы включает два операционных понятия: <пространство>, <искусство>, выступающими ключевыми концептами исследования. Их вербализация связана с эстетико-искусствоведческими и социокультурными предикатами термина <пространство>, такими как художественное пространство, эстетическое пространство и эстетика пространства, интерпретационное пространство, рецептивное пространство, перцептуальное, пространственный код, пространственные структуры, социокультурное пространство, публичное пространство, коммуникативное пространство, аксиологическое, семиотическое. Конструкция <пространство искусства> выступает в качестве идеализированного объекта – интегрированной модели исследуемого объекта.

Поскольку предметный фокус работы фиксируется на проблеме <пространства>, первым логически шагом исследования становится процедура операционализации, анализ лексемы <пространство> как ключевого концепта-метафоры. Следует подчеркнуть, что метод метафоризации, как и собственно научная метафора в современной методологии признаны одним из действенных ресурсов реконструкции научного знания; это «когнитивный агент», организующий, структурирующий научное поле, создающий эмпирические рамки для продуктивного освоения абстрактных концептов. В силу значительного исследовательского потенциала концепт <пространство> становится приоритетным в вопросах современного конструирования картины мира. «Осмысление науки в целом, отдельных дисциплин, направлений и научных школ реализуется, прежде всего, через пространственные метафоры. В качестве отдельного пространства может быть осмыслен любой абстрактный феномен» [2].

Метод пространственной концептуализации обобщает различные научные интерпретации этого концепта. Современный взгляд на исторически сложившиеся представления о сущности понятия <пространство> стимулирует его изучение в контексте интегрированного знания, опирающегося на многообразные формы культурного опыта, что предполагает обращение к междисциплинарной методологии.

Проблема пространства продуктивно разрабатывается учеными-лингвистами. Пространство интерпретируется как «культурное, переживаемое человеком пространство, которое не только отражается в мышлении, но и порождается им» [3]. Пространство «рукотворно», формируется в процессе человеческой деятельности, благодаря которой человек адаптируется уже не столько к внешним изменчивым условиям жизни, но в большей степени, к пространству и времени, которое созидает, проектирует: «пространство не является простымместищем объектов, а скорее наоборот – конструируется ими и в этом смысле оно вторично по отношению к объектам» [4]. В когнитологии категория <пространство> признается доминантной категорией познавательной деятельности, основанием всей системы знаний. В психологии вербализация концепта <пространство> устойчиво связана с представлением о нем как образе сознания и творчества [5].

Среди множества философско-эстетических пространственных теорий и теорий художественного пространства, в первую очередь, следует обратить внимание на те из них, которые корреспондируют с авторской интенцией. Объяснение <пространства> через «рядоположенное понятие «пространственного места», культурно-конструируемого пространственного смысла, формируемого под воздействием культурных установок и правил» [6], интерпретация <пространства> как формы выражения духовных ценностей – выделяется как наиболее релевантная позиция

Для тематизации ключевого концепта исследования определенное значение имеют искусствоведческие концепции. «Мысль о пространстве» Ф. Будона – ученого-архитектора сочетается с философским пониманием «концептуального пространства мысли, в котором мышление строит модели реальности» [7]. Наряду с концептуальным пространством, Ф. Будон характеризует реальное, и перцептуальное пространство. Если реальное пространство разворачивается вне человеческого сознания, то перцептуальное пространство определяется как реальное пространство, данное в любых формах чувственного восприятия человека, что имеет непосредственное отношение к восприятию произведений искусства.

Типология <пространства искусства> является необходимым звеном исследования, способствующим разрешению ряда классификационных задач: выявлению разнородных по составу множеств объектов и их упорядоченному описанию. Категориальные ряды пространств множественны, настраивая аналитическую оптику на пространственную парадигму искусства, сконцентрируем внимание на нескольких немногих конструктах, среди которых: художественное пространство, эстетическое пространство, пространство культуры.

Пространство искусства выступает как разновидность социального пространства. Классики социологии, Ф. Теннис – автор термина, и Г. Зиммель, развивали в своих трудах мысль о том, освоенное человеком пространство социально. В конце XX века, П. Бурдьё в своей работе «Физическое и социальное пространство» (1990) дает, ставшее классическим, определение социального пространства как абстрактного пространства, которое конституируется ансамблем подпространств или полей (таких как, например, экономическое поле, интеллектуальное поле и др.) [8].

Анализируя <пространство> в соответствии с заданным вектором работы, рассмотрим наиболее распространенную оппозицию <художественное пространство – пространство искусства>. Что касается левой ее части, то здесь надо иметь в виду, что художественное пространство, не свойственное реальному миру, присуще лишь образным моделям действительности, воссоздаваемым в произведениях искусства. Относительно правой части оппозиции отметим следующее: в истории философско-эстетической мысли существует устойчивая традиция все известные виды искусства вписывать, «заключать» в рамки художественного пространства. Это означает, что все виды искусства принадлежат одному интегрированному пространству: театральное, изобразительное, музыкальное, поэтическое искусство, искусство скульптуры и литература принадлежат пространству мира искусства. Необходимо подчеркнуть, что если в философских исследованиях представления о художественном пространстве обобщены и тематизированы на материале большого числа исследований, то тема <пространство искусства> остается практически не разработанной.

Как уже отмечалось ранее, в построении авторской модели <пространства искусства> базисное значение имеет пространственная концептуализация П. Бурдьё. Некоторые аспекты этой концепции получили развитие в рамках отечественной социологии искусства. Структурируя «поле искусства», проф. М.Л. Магидович выделяет в нем такие составляющие: художественные стили и направления, рассматривая их в контексте социальных явлений, общественной мысли; восприятие произведений искусства; художественный труд [9].

<Пространство искусства> представляет многоструктурную модель, образующуюся из конфигурации центра и периферий. «Наделенное идеальным основанием» пространство искусства «обладает материальным носителем, в качестве которого выступают выработанные в процессе исторического развития человечества феномены культуры, воплощающие «идеальное». Таким материальным объектом выступает произведение искусства» [10]. Это устоявшееся представление является краеугольным камнем концепции <пространство искусства>.

Различные виды художественного сознания, материализованные в произведениях искусства, составляющих уникальное пространство «художественного разнообразия», пред-

ставляют собой «сердцевину» пространственной модели, главную фигуру, центральный объект, интегрирующий пространство искусства.

При исследовании пространственных структур особое значение приобретает метод топологического описания, который сложился в социальной топологии под влияние математической теории¹. Топологический подход, позволяет интерпретировать пространство искусства в виде динамически связанной системы топосов. Таким образом складывается представление о топологически структурированном пространстве искусства. Понятие топос («топос» от греч. *topos* – место) обозначает место действия в художественной реальности и выступает в значении меры пространственного порядка, структурной организации. В пространстве искусства можно выявить ансамбль топосов.

Первый топологический ракурс связан с символическим пространством искусства, которое объективировано в духовно-эстетических ценностях художественных произведений. Он представляет собой центр концептуализированного пространства искусства.

Второй топологический ракурс – многоструктурное институциональное пространство социальных отношений, включающее, во-первых, профессиональные отношения людей творческих профессий, во-вторых, отношения профессионалов – непрофессионалов – творцов и публики и, в-третьих, – экономические, юридически-правовые и другие социальные отношения.

Третий топологический ракурс – предметное пространство, заключенное в физическое пространство. Он распространяется на материальные объекты: это здания, где репрезентируются произведения искусства, исполнительский инструментарий, материальные носители художественных текстов и многое др.

Рассмотрим последовательно названные формы пространственной концептуализации.

Первый топологический ракурс указывает на все неисчислимо многообразие художественных творений некогда созданных, тех, что создаются теперь, и тех, что появятся в будущем. Пространственный показатель раскрывается через ось времени – прошлое – настоящее – будущее [11]. Пространство искусства постоянно расширяется за счет появления все новых и новых произведений и артефактов, что свидетельствует о его разомкнутости.

Художественное произведение наделено имманентными качествами, как-то: однократность, уникальность, оригинальность, неповторимость, интегральная целостность. Перечисленные свойства произведения искусства predeterminedены художественной индивидуальностью автора, отражающего в своем творчестве веяния времени.

Второй топологический ракурс. Искусство академической традиции – искусство авторское, а это значит, что в пространстве искусства «получают прописку» творческие одаренные представители цеха искусства: авторы художественных произведений и соавторы, исполнители, интерпретаторы, режиссеры, кураторы выставок и т.д. Взаимоотношения между деятелями искусства в процессе создания и интерпретации произведений образует институциональное пространство профессиональной деятельности. В этот ракурс может быть включено искусствоведение. Исствоведение – обобщенное название комплекса наук, к числу которых можно отнести музыковедение, искусствознание, театроведение, историю искусств, эстетику, социологию искусства, культурологию, теорию искусств, музыковологию, художественную критику, интерпретационные теории.

Искусство без референта – нонсенс. «Художественные произведения становятся фактами культуры тогда, когда они доходят до публики. Они должны быть не только созданы, но и восприняты людьми» [12]. В пространство искусства вписано референтное пространство, институциональное пространство взаимодействия аудитории искусства (зрителей, слушателей, читателей) с профессионалами, причастными к созданию и представлению произведений искусства публике.

В пространстве производства художественной продукции, ее, трансляции, сохранения, тиражирования, продвижения на художественном рынке складываются взаимодействия

с другими пространствами, например, финансово-экономического плана, юридически-правового.

Третий топологический ракурс. Развитие искусства невозможно без институциональных форм, отвечающих за механизм функционирования (бытие) искусства: трансляцию, сохранение, интерпретацию, тиражирование произведений искусства. За функционирование искусства отвечают институты репрезентации искусств, такие, в частности как театр, концертный зал, музей, храм и др.

Содержанием категорий пространства и времени, с которым оно нерасторжимо связано, является совокупность фундаментальных признаков, как-то: протяженность, рядоположенность, длительность, последовательность, непрерывность-прерывность, устойчивость-изменчивость, бесконечность, размерность, необратимость, трехмерность или многомерность и другие.

Далеко не все известные свойства физического пространства преломляются в содержании концепта <пространство искусства>. В частности, субстанциональная характеристика, рассматривающая объективность пространства, его независимость от материальных объектов, не может быть спроецирована на исследуемый объект, ибо искусство – есть продукт художественной активности человека, стало быть, и пространство искусства без человеческого участия представить невозможно.

По отношению к пространству искусства не применимы метрические процедуры (т.е. измерения), исследованию подлежат топологические свойства, такие как связность, симметрия, прерывность и непрерывность, ориентируемость, размерность.

В концепции пространства, времени и симметрии последняя определяется как неизменность, инвариантность каких-либо свойств и характеристик объекта, порядок, равновесное состояние, относительная устойчивость, пропорциональность и соразмерность между частями целого. В противоположность симметрии асимметрия интерпретируется как изменение, развитие и организационная перестройка, ведущие к эволюции, образованию нового [13].

Среди релевантных свойств пространства искусства можно назвать следующие.

1. Всеобщность. Пространство искусства является общим наследием человечества. Его характеризует свобода творческой деятельности, свобода доступа.

2. Открытость границ. Пространство искусства включает наряду с уже существующими видами, жанрами, стилями, направлениями искусства те художественные феномены и явления, художественные произведения и артефакты, которым суждено появиться в будущем, что свидетельствует об открытости границ пространства искусства вовнутрь. С внешней стороны открытость пространства искусства проявляется во взаимодействии со сложно структурированным социокультурным пространством, например.

3. Необъятность, неизмеримость. Чем больше появляется художественных феноменов, книг, художественных произведений, относящихся к различным видам искусства, тем необъятнее становится пространство искусства и тем сложнее его конфигурация.

4. Многомерность. Пространство искусства, как пространство космоса, Интернета – многомерно. Живая материя, живое пространство – это принципиально неевклидово пространство (В.И. Вернадский).

5. Целостность. Подобно тому, как социальное пространство «скрепляется» социальной структурой, пространство искусства «скрепляется», благодаря взаимодействию социальных общностей представителей творческих профессий и активности непрофессионалов, интериоризирующих творческий продукт – это одна сторона проблемы целостности. Категория «целостность» может быть рассмотрена с другой точки зрения как выражение идеи единства материальной и духовной структур пространства искусства, их диалектическое сопряжение: материальное выступает как своего рода «хранилище» духовного, а все духовное реализуется посредством материального.

6. Динамичность. Движение – суть всякое изменение – образует пространство. Благодаря этому представлению стало возможным изучение природы таких не имеющих четких границ объектов, которые постоянно находятся в становлении, обнаруживая свою незавершенность, пульсацию.

7. Духовно-эстетическая значимость. В противопоставлении геометрическому и физическому пространству пространство искусства истолковывается как выражение особой духовной реальности (П.А. Флоренский). «Ценностный компонент присущ концепту <пространство>, как любому ментальному образованию, отправляющему к духовной жизни человека» [14]. В пространстве искусства человеку дано актуализировать свой творческий потенциал. Пространство искусства может стать пространством интеграции личного мира человека и реальности, этических и эстетических представлений, формирования социально значимой ценностно-нормативной системы [15].

8. Пространство искусства – пространство, в котором бытие искусства может быть определено как самовоспроизведение, саморазвитие, самодетерминация, самодвижение, избыточное генерирование потенциальных возможностей самоосуществления [16]¹.

В завершении работы сформулируем некоторые выводы.

Многомерность пространства искусства, как объекта изучения, предстает в виде ансамбля топологических ракурсов (подпространств). Пространство искусства маркируется художественными объектами, авторами и соавторами, институтами репрезентации (включающими также материальные ресурсы: здания, инструменты художественной деятельности, необходимое техническое оснащение и др.), рецептивной аудиторией, а также интеллектуальным «сопровождением» – комплексом искусствоведческих наук и наук социально-гуманитарного профиля.

Центром пространственной конструкции, ее ценностно-смысловой сердцевиной является художественный феномен – произведение искусства, артефакт, что отличает данную модель от других известных моделей в культурологии и социологии.

Концепт <пространство> позиционируется как методологическая установка и инструмент исследования. Модель <пространства искусства> конструируется следующим образом: пространство искусства вбирается социокультурным пространством и выступает в качестве его подпространства, и вместе с тем предстает как многосложное образование, включающее ряд форм пространственной концептуализации – топологических ракурсов. Пространство искусства – составляющая исторического пространства. Пространство искусства соразмерно коммуникативному пространству искусства, не будучи его подпространством, и не вбирая в себя коммуникативное пространство в качестве одной из форм пространственной концептуализации. То же относится к аксиологическому, семиотическому, информационному пространствам, а также к технологическому, экономическому и политико-правовому пространствам искусства.

Концептуальное пространство искусства – полифония пространств – приобретает значение метаконцепта. Переинтонируя выражение В.В. Савельевой, сформулируем тезис о всеохватности пространства искусства: которое можно представить как «состояние, в котором одновременно потенциальны все пространства»².

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобрихин А.А. Концептуализация пространства в культуре: автореф. дисс. ... к. филолоф. н. (<http://www.dissercat.com/content/kontseptualizatsiya-prostranstva-v-kulture>).

¹

²

- 2,3. Мишанкина Н.А. Лингвокогнитивное моделирование научного дискурса: автореф. дисс. ... д.филол.н. (<http://rudocs.exdat.com/download/docs-197576/197576.doc>).
4. Яковлева Е.С. Фрагменты русской языковой картины мира (модели пространства, времени и восприятия) / Е.С.Яковлева. М.: Изд-во «Гнозис», 1994. 334 с.
5. Мешкова И.Н. Смысловая эволюция концептов пространства и времени в современной культуре: автореф. дисс. ... к.философ.н. (<http://www.dissercat.com/content/smyslovaya-evolyutsiya-kontseptov-prostranstva-i-vremeni-v-sovremennoi-kulture>)
- 6,7. Раппапорт А.Г. Концепции архитектурного пространства (http://papardes.blogspot.com/2009/11/blog-post_28.html).
8. Основные понятия концепции П. Бурдье // Альманах «Восток». 2004 Вып. 11 (23), (http://www.situation.ru/app/j_art_632.htm#_Тoc40420595).
9. Магидович М. Поле искусства как предмет исследования (<http://magazines.russ.ru/nlo/2003/60/magid.html>).
10. Орлова Е В. Театральное пространство в структуре художественного пространства: системный анализ (<http://anaculturolog.ru/component/k2/item/588-theatrical-space-in-the-structure-of-art-space-systems-analysis.html>).
11. Фомина М.Н. Философская культура: онтологический диалогизм / М.Н. Фомина. Чита: Поиск, 1999. 160 с.
12. Кармин А.С. Культурология / А.С. Кармин, Е.С. Новикова. СПб.: Питер, 2006. 464 с.
13. Концепция пространства, времени и симметрии (<http://new.marsu.ru/GeneralInformation/structur/HelpUnits/libr/resours/kse/textdoc/lekc5.pdf>).
14. Мухачёва А.М. Пространственные метафоры как фрагмент русской языковой картины мира: автореф. дисс. ... к.филол.н. 2003 (http://planetadisser.com/see/dis_4447377.html).
15. Песоцкий В.А. Основные функции художественной литературы в их философском представлении // Вестник Московского государственного областного университета: электронный журнал. 2011/1/Философия. (www.evestnik.mgou.ru).
16. Синцова С.В. Художественное предвидение морфологических новообразований искусства средствами словесного творчества: автореф. дисс. ... к.философ.н. (<http://www.referun.com/n/hudozhestvennoe-predvidenie-morfologicheskikh-novoobrazovaniy-iskusstva-sredstvami-slovesnogo-tvorchestva>).

Чепеленко Ксения Олеговна –
кандидат социологических наук
преподаватель СГМУ

ТЧепеленко Ksenia Olegovna –
The candidate of sociological sciences
Teacher of SGMU

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

ЭКОНОМИКА

УДК.33:001.895

Ю.О.Глушкова, А.В. Пахомова

ФОРМИРОВАНИЕ И ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К КООРДИНАЦИИ ВНЕШНЕТОРГОВЫХ ПОТОКОВ В РАМКАХ АТЭС

Исследуются особенности формирования внешнеторговых потоков стран АТЭС на основе инновационных подходов к управлению логистическими процессами, обеспечивающих снижение логистических затрат по цепи поставок грузов внешней торговли.

Внешнеторговые потоки, инновационный подход, страны АТЭС

YU.O.GLUSHKOV, A.V.PAKHOMOVA

FORMATION AND INNOVATIVE APPROACHES TO COORDINATION OF THE FOREIGN TRADE STREAMS WITHIN APEC

Features of formation of the foreign trade streams of the countries of APEC on the basis of innovative approaches to management of the logistic processes, logistic expenses providing decrease on a chain of deliveries of cargoes of foreign trade are investigated.

The foreign trade streams, innovative approaches, the countries of APEC

Формирование внешнеторговых потоков стран АТЭС требует инновационных подходов к организации и управлению процессами таможенного оформления, складирования, транспортировки.

Быстро снижающиеся реальные транспортные и телекоммуникационные расходы порождают новые условия для взаимодополнения между национальными хозяйствами стран, входящих в АТЭС. То, что такие различные страны смогли поставить перед собой единые задачи, свидетельствует о их намерении совместно трудиться ради дальнейшего экономического развития.

Глубокие различия, которые существуют между этими странами и затрудняют их сотрудничество, относятся к культуре, уровню используемой технологии, формам государственной власти и правовым устоям – факторам, усугубляемым историческим наследием колониализма и недавними военными конфликтами.

Цель АТЭС с того времени, когда его участники провозгласили Богорскую декларацию о свободе торговли и инвестиций, состоит в том, чтобы найти компромисс между различными подходами к вопросу экономического сотрудничества.

Цели деятельности Азиатско-Тихоокеанского Форума Экономического Сотрудничества были официально определены в 1991 в Сеульской декларации. Это – обеспечение

режима свободной открытой торговли согласно нормам ГАТТ/ВТО и укрепление регионального сотрудничества. В 1994 в качестве стратегической цели объявлено создание к 2020 в АТР системы свободной и открытой торговли и либерального инвестиционного режима. Наиболее развитые страны осуществили либерализацию торговли, причем каждая страна самостоятельно определили свой статус и сроки введения новых режимов на основе индивидуальных планов действий.

Организация Азиатско-Тихоокеанского Экономического Сотрудничества (АТЭС) объединяет 21 страну. В конце минувшего века в нее приняты Россия, Вьетнам и Перу. Тогда же было решено «заморозить» прием новых членов на ближайшие 10 лет. Появлению АТЭС в 1989 году предшествовало создание в Азиатско-Тихоокеанском регионе (АТР) ряда объединений экономического характера. Их цель состояла в том, чтобы наладить деловые связи и способствовать осмыслению огромного хозяйственного потенциала входящих в него стран. К числу этих объединений относились Тихоокеанский совет экономического сотрудничества и Экономический совет стран Тихого океана.

По мере усиления взаимозависимости стран региона становилась все более очевидной и потребность в созыве форума на правительственном уровне. В январе 1989 года тогдашний министр Австралии Боб Хоук выступил с инициативой созыва встречи министров, представляющих экономику стран региона, с целью создания принципиально новой организации по экономическому сотрудничеству. Предложение Б. Хоука было воспринято в регионе как «идея, время которой настало».

Первая встреча состоялась в столице Австралии Канберре в ноябре 1989 года. На ней было представлено 26 министров из 12 стран. Они выработали следующие базисные принципы организации АТЭС.

1. Цель АТЭС состоит в том, чтобы поддержать развитие в регионе, направленное на повышение жизненного уровня народов и рост мировой экономики.

2. Сотрудничество должно ставить своей задачей установление открытой многосторонней торговой системы.

3. Сотрудничество должно строиться предпочтительно на экономической, а не политической или стратегической основе, с тем чтобы реализовать общие интересы и усиливать конструктивную взаимозависимость путем поощрения движения товаров, услуг, капитала и технологий.

На первом форуме министров стран АТЭС было решено такие встречи проводить ежегодно, а также устраивать по возможности чаще встречи региональных лидеров для обсуждения на них вопросов дальнейшего расширения экономического сотрудничества. Последующие ежегодные встречи министров иностранных дел и торговли состоялись в Сингапуре, Сеуле, Бангкоке, Сиэтле, Джакарте, Осаке, Маниле. В 1997 году встреча министров проводилась в Канаде, в 1998 году она пройдет в Малайзии.

Первая встреча руководителей стран АТЭС состоялась в 1993 году в американском городе Сиэтле. В специальном заявлении они подчеркнули необходимость поддержки многосторонней торговой системы и свою готовность продолжать понижать торговые и инвестиционные барьеры. Лидеры согласились поощрять внедрение в практику ряда инвестиционных принципов, хотя и не обязательных к исполнению.

Особенно важным оказалось следующее совещание лидеров стран АТЭС, прошедшее в ноябре 1994 года в Богоре (Индонезия). Они взяли от имени своих государств обязательство установить свободный торгово-инвестиционный режим не позднее 2020 года, то есть отменить всякие ограничения в этой области. Что касается индустриализации стран АТЭС, то они обещали выполнить эту задачу еще раньше – к 2010 году. Это и следует рассматривать ныне как конечную цель деятельности АТЭС.

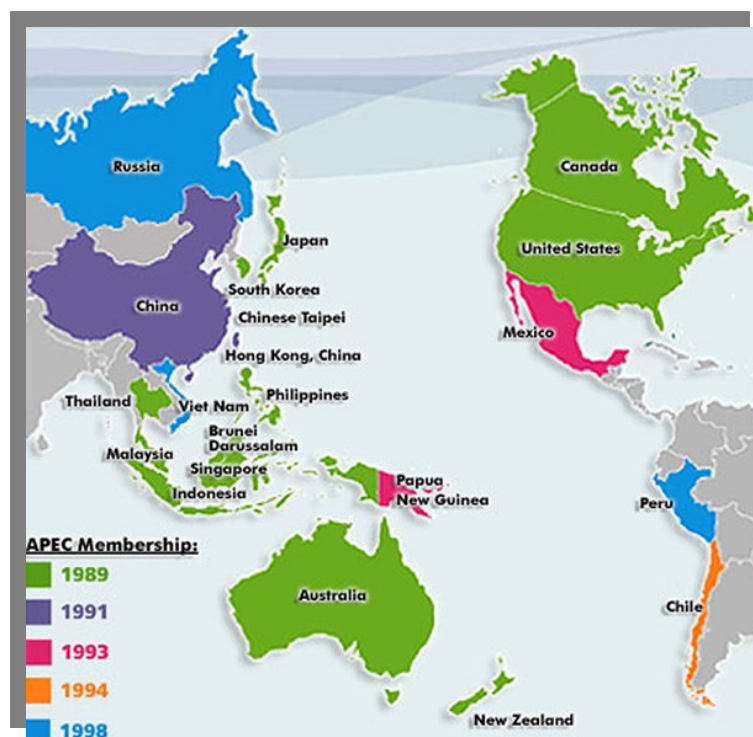
К настоящему времени участниками АТЭС являются 21 страна и территория – Австралия, Бруней, Гонконг, Канада, Чили, Китай, Индонезия, Япония, Южная Корея, Малайзия, Мексика, Новая Зеландия, Папуа – Новая Гвинея, Филиппины, Сингапур, Тайвань, Таиланд, США, Россия, Вьетнам, Перу. Некоторые из этих стран и территорий не были

инициаторами создания АТЭС, а вступили в организацию несколько позднее, в том числе Китай, Гонконг и Тайвань в 1991 году, Мексика и Папуа – Новая Гвинея – в 1993 году, Чили – в 1994 году, Россия, Вьетнам и Перу – в 1997 году.

Обращает на себя внимание экономическая разномерность стран, входящих в АТЭС. Наряду с великими державами здесь присутствуют и страны среднего уровня экономического развития и страны с еще низким хозяйственным потенциалом. Они отличаются также существенно по своим размерам, плотности населения, природным ресурсам. Эти различия открывают огромные возможности для осуществления взаимной торговли и инвестиций.

Представляют интерес темпы развития стран АТЭС.

Вес стран АТЭС в мировой экономике и народонаселения весьма впечатляет. На них приходится почти 40 процентов населения нашей планеты. Но еще более значима роль стран АТЭС в мировом хозяйстве. В 1994 году они производили 56 процентов мирового продукта. Велика доля этих стран в международной торговле. С 36,2 процента в 1980 году она возросла в 1994 году до 45 процентов, что объясняется главным образом резким увеличением экспорта стран Восточной Азии. За пятилетие (до 1994 года) совокупный доход стран АТЭС увеличивался на 9,6 процента в год по сравнению с расширением всего мирового экспорта за это время на пять процентов.



Страны АТЭС

Главными производителями не только в АТЭС, но и во всем мире в 1994 году были США (26,5 процента) и Япония (17 процентов). На Китай приходилось тогда 2,5 процента мирового производства (расчеты МБРР), и по этому показателю он был третьим среди стран АТЭС. Существуют, однако, и другие, пожалуй, более точные расчеты, исходящие из так называемого паритета покупательных способностей валют (ППСВ). Хотя и в этом случае совокупная доля стран АТЭС в мировом производстве примерно такая же (54 процента), а США сохраняют роль мирового лидера. Но совершенно по-другому выглядит в этом случае положение Китая, который перемещается на второе место, обходя Японию. Характерно, что Азиатско-Тихоокеанский регион включает в себя некоторые из наиболее быстро развивающихся стран мира. Это прежде всего страны Восточной Азии, темпы экономиче-

ского роста которых в последнее десятилетие составляли примерно 8,5 процента в год. По некоторым признакам к 2020 году доля стран АТЭС мировом производстве, исчисленная по ППСВ, составит примерно две трети его объема. Однако вполне вероятно, что к этому времени внутри группировки произойдут еще большие изменения, поскольку допускается возможность, что Китай в первом или втором десятилетии следующего столетия сможет (по критериям ППСВ) стать крупнейшей экономической державой мира.

Страны АТР уже характеризуются высокой степенью взаимозависимости. Это - одна из причин образования АТЭС как важнейшего регионального форума в мире, 73 процента товарооборота стран АТЭС в 1995 году осуществлялось в рамках этой организации. Экономический рост в странах объединения и происходящие там структурные изменения, как правило, направлены на усиление региональной взаимозависимости. Среди восточно-азиатских государств Япония во все возрастающей степени делает ставку на развитие научно-исследовательских отраслей, инновационных, тогда как новые индустриальные страны региона («Азиатские тигры») все больше вторгаются в отрасли, где прежде доминировала Япония. Китай и те страны АСЕАН, которые менее развиты в промышленном отношении, стали конкурентоспособными поставщиками трудоемких видов продукции. Китай является теперь крупнейшим в мире экспортером таких товаров, тогда как «азиатские тигры» стали покупать этой продукции больше, чем ее продают,

Привлечение прямых инвестиций извне также является важным средством cementирования взаимозависимости. В АТЭС входят три главнейшие в мире участника движения капиталов: США, Японии и Китай, являющийся к тому же основной сферой приложения инвестиций. Почти половина их поступает в АТЭС из этих стран. Прямые иностранные инвестиции в регионе способствуют его быстрому экономическому росту. По подсчетам МБРР, капиталовложения в восточно-азиатские страны среднего и относительно низкого развития составляли в 1993-95 годах 3,1 процента их ВВП, или были вдвое выше, чем в любой другой экономической группировке стран мира.

В 1993 году средний уровень импортных пошлин исчислялся для стран АТЭС примерно в 14 процентов. Наиболее высокие таможенные барьеры воздвигались перед сельскохозяйственными и готовыми промышленными товарами. Однако в дальнейшем тарифы стали быстро снижаться. За последние годы на промышленную продукцию они уменьшились в Южной Корее на 62 процента, в Малайзии на 49 процентов, на Филиппинах на 36, в Таиланде на 53, в Японии на 33 процента.

Далее необходимо проанализировать инновационные подходы к координации взаимодействия стран АТЭС

Деятельность АТЭС осуществляется через посредство ряда созданных для координации ее деятельности органов. Так, в январе 1993 года в Сингапуре был образован секретариат, который формирует рабочие программы, облегчает связь между членами организации и обеспечивает контакты государственных, предпринимательских и других учреждений. В том же году был создан Комитет по торговле и инвестициям. Его функции состоят в организации обсуждения назревших вопросов и создании необходимых условий для развития торговли в регионе, особенно в таких сферах, как стандартизация, взимание пошлин и нетарифные ограничения, а также в решении проблем, связанных со сферой инвестиций. Например, работа по стандартизации продукции нацелена на то, чтобы снизить издержки ее производства путем выравнивания стандартов стран-членов с международными стандартами, взаимного признания требований, предъявляемых к проверке продукции, и выдачи соответствующих сертификатов.

Учрежденный в 1994 году Экономический комитет АТЭС служит форумом для обмена экономической информацией и мнениями по вопросам хозяйственного развития в регионе. Комитет по административно-бюджетным вопросам был образован с целью оказания помощи руководящим деятелям в их ориентации по вопросам финансов и управления проектами, относящимися к рабочей программе АТЭС. В 1995 году ее бюджет составил около 2,2 миллиона долларов.

На ежегодных министерских встречах определяются объем работ и финансирование программ Комитетов и рабочих групп. Действует 10 рабочих групп, обеспечивающих практическое сотрудничество в регионе по вопросам телекоммуникаций, транспорта, торговли, рыболовства, энергетики, подготовки кадров, туризма и передачи технологии.

Различные страны АТЭС по-разному понимают некоторые аспекты будущего. Так, очевидно, что США, последовательно противостоящие предоставлению односторонних торговых уступок, будут стоять на принципе регионализма. Канадское правительство также выступает против распространения свободной торговли на нечленов организации. Однако азиатские члены АТЭС серьезно противостоят формированию региональной зоны торговли, которая устанавливала бы для них какие-либо ограничения.

На встрече в верхах в Осаке в 1995 году была предпринята попытка добиться компромисса между странами АТЭС по вопросам, связанным с процессом либерализации в области торговли. В ноябре 1996 года на встрече в Маниле лидеры стран выступили с четкими планами, именованными «планами действий». Однако не была определена окончательная дата отмены пошлин. Отсутствовало единство и по вопросу снижения нетарифных барьеров.

Только немногие страны приняли твердый график снижения своих внешних барьеров. США и Канада указали, что они пойдут на либерализацию торговли, если другие страны сделают соответствующие уступки, а «в плане действий» новое австралийское правительство подчеркнуло, что оно будет продолжать сокращать тарифы после 2000 года, если другие страны АТЭС выполнят свои собственные планы.

Таким образом, формирование внешнеторговых потоков в рамках деятельности АТЭС, являющейся наиболее представительной из всех существующих в АТР экономических организаций, направлено на усиление взаимодействия стран глобализирующейся экономики.

Глушкова Юлия Олеговна –
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Прикладная экономика
и управление инновациями»
Саратовского государственного
технического университета

Gluschkova Yuliya Olegovna –

Пахомова Алла Викторовна –
кандидат экономических наук,
профессор кафедры «Менеджмент
туристического бизнеса»
Саратовского государственного
технического университета

Pachomova Alla Viktorovna –

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 519.2

Е.Ю. Томашевский, Н.П. Митяшин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА В МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНАЛЬНОГО ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЦЕССА

В рамках трёхуровневой модели оценки эффективности регионального инвестиционного процесса, предложено для оценивания инвестицион-

ных проектов использовать систему нечеткого вывода. В качестве входных переменных используются: время выполнения, сумма инвестиций, степень равномерности финансирования и степень достижения цели проекта. В качестве выходных – величина дохода и степень риска. На основе построенной системы нечеткого вывода произведена оценка вложения инвестиций в спортивную сферу.

Инвестиционный проект, система нечеткого вывода, величина дохода, степень риска

E.Y. Tomashevskiy, N.P. Mityashin

FUZZY MODEL FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF REGIONAL INVESTMENT PROCESS

As part of a three-level model of evaluation of the effectiveness of regional investment process, proposed to evaluate investment projects use a system of fuzzy logic. The input terms are: time period of a project; capital investments; uniformity of the financing; successfulness of a project. The output terms are: profit and risk. On basis of created fuzzy control system the evaluation of investments in sports is done.

Investment project, fuzzy control system, profit, risk

Разработка и совершенствование методов экономико-математического моделирования инвестиционных проектов (ИП) в условиях современной рыночной экономики является актуальной проблемой. Ее решение позволяет просчитать различные варианты принять их эффективность в условиях сложной структуры инвестиционных возможных ограничений. Существующие способы этой оценки не лишены изв статков. В данной статье нами предлагается оценочная модель, базирующаяся нечёткой логики, использование которой позволяет избежать некоторых существ проблем, сопутствующих традиционным методикам.

Прежде всего, коснёмся общих вопросов регионального инвестирования трёхуровневую модель оценки эффективности регионального инвестиционно представленную на рис. 1.

Создание модели для определения эффективных направлений инвести тельности (НИД) базируется на системном анализе, а также на использовании ских методов (группир информационную базу со сведения государственной ресурсы сети Интернет.

Экономико-математические модели (ЭММ) второго уровня предназначены для оцен ки эффектив НИД₁ брань зом уровне направлений НИД_i ования с учётом соот ветствующих источников и НИД_i финансирования.

Третий уровень моделей осуществляет оценку эффективности конкретных инвести ционных пр нем.

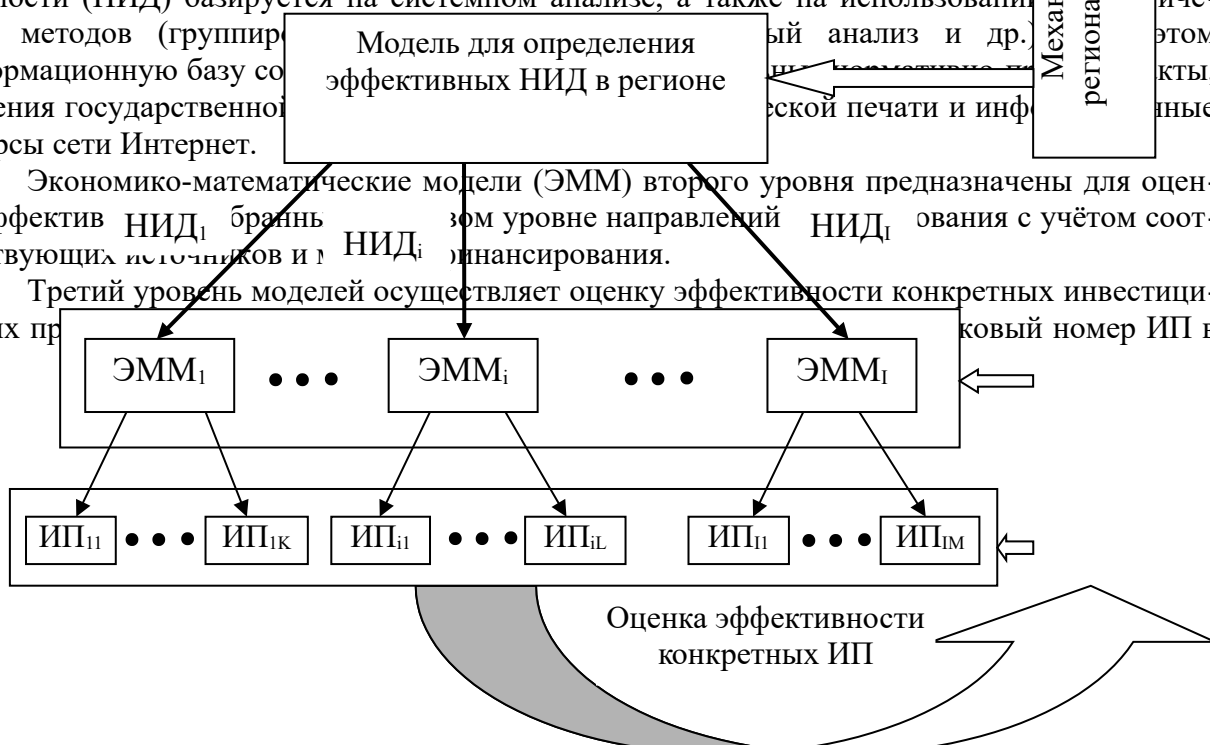


Рис. 1. Трехуровневая модель оценки эффективности регионального инвестиционного процесса

Следует отметить, что механизм финансирования регионального инвестиционного процесса (горизонтальные связи в представленной структурной схеме модели) - это составная часть системы регулирования инвестиционной деятельности, позволяющая региональным органам власти и управления, а также другим региональным экономическим субъектам привлечь необходимый объем финансовых ресурсов с использованием соответствующих методов мобилизации источников на основе определенных принципов для достижения целей социально-экономического развития региона.

Рассмотрим третий уровень. Ключевая проблема – это оценка эффективности собственно региональных инвестиционных проектов, учитывающая цели и интересы всех его участников: регион в целом, региональные органы власти, предприятия, население.

Информационная неопределенность представления ИП влечет неустранимый риск принятия инвестиционных решений. Способ его оценки прямо связан со способом описания информационной неопределенности в части исходных данных проекта [1]. Традиционной для решения данной задачи является статистическая модель, основанная на вероятностной интерпретации показателей ИП. Однако, чем в меньшей степени статистически обусловлены те или иные параметры, чем слабее информационность контекста свидетельств о состоянии описываемой рыночной среды и чем ниже уровень интуитивной активности экспертов, тем менее может быть обосновано применение любых типов вероятностей в инвестиционном анализе.

Именно по этой причине была предложена идея разработки нечеткой модели для оценивания ИП. При этом в качестве такой модели используется система нечеткого вывода [2] со следующими входными и выходными переменными.

Предполагается использовать 4 входных и 2 выходных переменных. В качестве первой входной переменной $input1$ используется время выполнения ИП, второй $input2$ – сумма инвестиций, третьей $input3$ – степень равномерности финансирования и, наконец, четвертой $input4$ – степень достижения цели, получаемая в результате реализации ИП. В качестве первой выходной переменной $output1$ используется величина дохода, второй $output2$ – степень риска ИП.

В качестве терм-множества первой входной переменной $input1$ будем использовать множество $T_1 = \{\text{«Очень малое», «Малое», «Среднее», «Большое», «Очень большое»}\}$ с функциями принадлежности термов, изображенными на рис. 2. Максимальный срок составляет 10 лет.

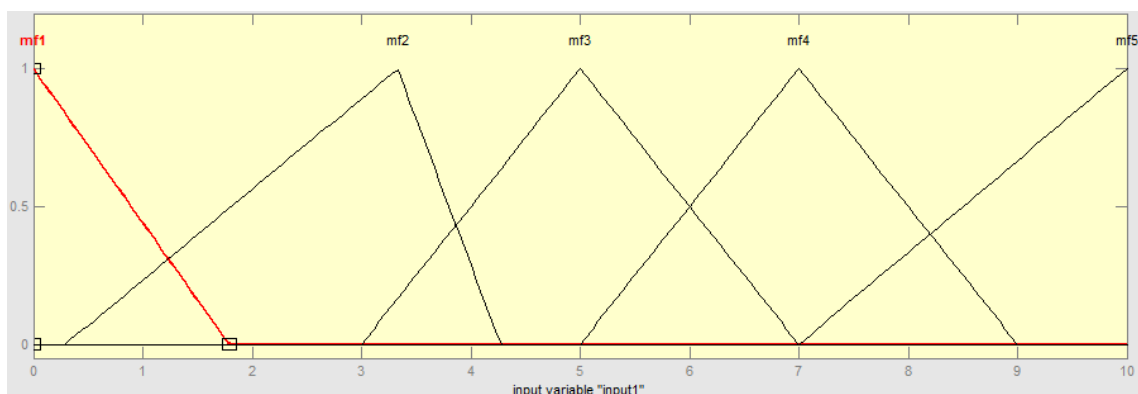


Рис. 2. Функции принадлежности термов лингвистической переменной «Время выполнения ИП»

В качестве терм-множества второй входной переменной $input2$ будем использовать аналогичное множество $T_2 = \{\text{«Очень малая», «Малая», «Средняя», «Большая», «Очень большая»}\}$. В качестве терм-множества лингвистических переменных $input3$ и $input4$ будем использовать множество $T = \{\text{«низкая», «средняя», «высокая»}\}$.

В качестве терм-множества выходной лингвистической переменной $output1$ «Доход» будем использовать множество $T_5 = \{\text{«Большие убытки», «Небольшие убытки», «Около нуля», «Небольшой», «Большой»}\}$ с функциями принадлежности термов, изображенными на рис. 3.

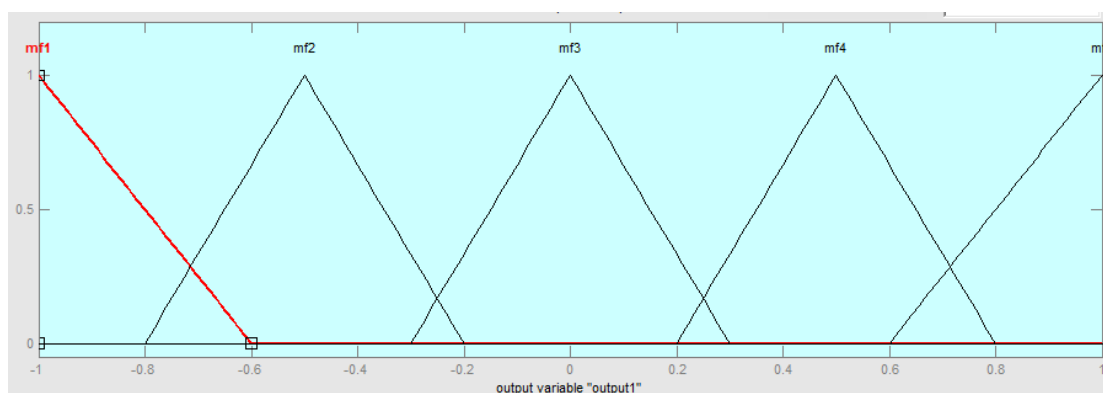


Рис. 3. Функции принадлежности термов лингвистической переменной «Доход»

В качестве терм-множества выходной лингвистической переменной $output2$ «Степень риска» будем использовать множество $T_6 = \{\text{«Незначительная», «Низкая», «Средняя», «Относительно высокая», «Неприемлемая»}\}$.

Следующим этапом построения модели является построение базы правил. Для этой цели будем использовать 25 правил нечетких продукций, которые удобно представить в виде рис. 4.

1. If (input1 is mf1) and (input2 is mf1) and (input3 is mf3) and (input4 is mf2) then (output1 is mf3)(output2 is mf1) (1)
2. If (input1 is mf1) and (input2 is mf1) and (input3 is mf1) and (input4 is mf1) then (output1 is mf2)(output2 is mf1) (1)
3. If (input1 is mf5) and (input2 is mf5) and (input3 is mf3) and (input4 is mf3) then (output1 is mf5)(output2 is mf4) (1)
4. If (input1 is mf3) and (input2 is mf3) and (input3 is mf2) and (input4 is mf2) then (output1 is mf3)(output2 is mf3) (1)
5. If (input1 is mf1) and (input2 is mf1) and (input3 is mf1) and (input4 is mf3) then (output1 is mf4)(output2 is mf1) (1)
6. If (input1 is mf1) and (input2 is mf5) and (input3 is mf3) and (input4 is mf3) then (output1 is mf4)(output2 is mf5) (1)
7. If (input1 is mf2) and (input2 is mf2) and (input3 is mf2) and (input4 is mf2) then (output1 is mf3)(output2 is mf2) (1)
8. If (input1 is mf3) and (input2 is mf3) and (input3 is mf3) and (input4 is mf3) then (output1 is mf4)(output2 is mf2) (1)
9. If (input1 is mf5) and (input2 is mf5) and (input3 is mf1) and (input4 is mf1) then (output1 is mf1)(output2 is mf5) (1)
10. If (input1 is mf4) and (input2 is mf4) and (input3 is mf2) and (input4 is mf2) then (output1 is mf3)(output2 is mf3) (1)
11. If (input1 is mf4) and (input2 is mf1) and (input3 is mf3) and (input4 is mf2) then (output1 is mf3)(output2 is mf1) (1)
12. If (input1 is mf2) and (input2 is mf5) and (input3 is mf1) and (input4 is mf1) then (output1 is mf1)(output2 is mf5) (1)
13. If (input1 is mf3) and (input2 is mf1) and (input3 is mf2) and (input4 is mf3) then (output1 is mf4)(output2 is mf1) (1)
14. If (input1 is mf5) and (input2 is mf3) and (input3 is mf1) and (input4 is mf2) then (output1 is mf3)(output2 is mf4) (1)
15. If (input1 is mf4) and (input2 is mf2) and (input3 is mf3) and (input4 is mf3) then (output1 is mf4)(output2 is mf2) (1)
16. If (input1 is mf1) and (input2 is mf5) and (input3 is mf1) and (input4 is mf1) then (output1 is mf1)(output2 is mf5) (1)
17. If (input1 is mf2) and (input2 is mf3) and (input3 is mf3) and (input4 is mf2) then (output1 is mf3)(output2 is mf2) (1)
18. If (input1 is mf4) and (input2 is mf5) and (input3 is mf2) and (input4 is mf3) then (output1 is mf5)(output2 is mf3) (1)
19. If (input1 is mf1) and (input2 is mf4) and (input3 is mf3) and (input4 is mf2) then (output1 is mf3)(output2 is mf4) (1)
20. If (input1 is mf3) and (input2 is mf1) and (input3 is mf1) and (input4 is mf1) then (output1 is mf2)(output2 is mf2) (1)
21. If (input1 is mf2) and (input2 is mf1) and (input3 is mf2) and (input4 is mf3) then (output1 is mf4)(output2 is mf1) (1)
22. If (input1 is mf3) and (input2 is mf5) and (input3 is mf1) and (input4 is mf2) then (output1 is mf3)(output2 is mf5) (1)
23. If (input1 is mf5) and (input2 is mf5) and (input3 is mf2) and (input4 is mf2) then (output1 is mf3)(output2 is mf4) (1)
24. If (input1 is mf4) and (input2 is mf2) and (input3 is mf1) and (input4 is mf1) then (output1 is mf1)(output2 is mf4) (1)
25. If (input1 is mf1) and (input2 is mf2) and (input3 is mf2) and (input4 is mf1) then (output1 is mf1)(output2 is mf3) (1)

Рис. 4. База нечетких правил вывода оценки инвестиционных проектов

В качестве схемы нечеткого вывода будем использовать метод Мамдани, поэтому методом активации будет MIN, который рассчитывается по формуле

$$\mu'(y) = \min\{c_i, \mu(y)\},$$

где c_i – степени истинности подзаключений для каждого из правил, входящих в рассматриваемую базу правил системы нечеткого вывода; $\mu(y)$ – функция принадлежности термина, который является значением выходной переменной.

Поскольку во всех правилах 1-25 в качестве логической связки для подусловий применяется только нечеткая конъюнкция (операция «И»), то в качестве метода агрегирования будем использовать операцию min-конъюнкции. Для аккумуляции заключений правил будем использовать метод max-дизъюнкции, который также применяется в случае схемы нечеткого вывода методом Мамдани. Наконец, в качестве метода дефаззификации будем использовать метод центра тяжести.

Выполним анализ построенной системы нечеткого вывода для оценки вложения инвестиций на конкретном примере. Достаточно уместным, на наш взгляд, будет применение нечеткой модели для инвестиционных проектов спортивной сферы, ведь спортивный результат не может быть заранее предугадан с достаточно высокой точностью, спорт трудно-предсказуем во всех отношениях, а, как уже указывалось, традиционные вероятностные модели тем менее уместны, чем более неопределенны статистические параметры. К тому же актуальность вложений в спорт, как высших достижений, так и массовый, в современной России весьма высока. Рассмотрим инвестиции в футбольный клуб. Амбициозный проект рассчитан на несколько лет, в течение которых инвестор готов вложить до 100 млн долларов США.

С этой целью откроем окно просмотра правил системы MATLAB [2] и введем значения входных переменных для частного случая, когда значение входной переменной input1 «Время выполнения ИП» равно 3,64 года, второй input2 «Сумма инвестиций» – 11,6 млн. долларов США, третьей input3 «Степень равномерности финансирования» – 0,78 и, наконец, четвертой input4 «Спортивный результат» – 0,774.

Процедура нечеткого вывода, выполненная системой MATLAB для разработанной нечеткой модели, выдает в результате значение выходной переменной output1 «Доход», равное 25,2 %, а второй output2 «Степень риска», равное 0,397 (рис. 5), что хорошо согласуется с опытными данными в области спортивного менеджмента.

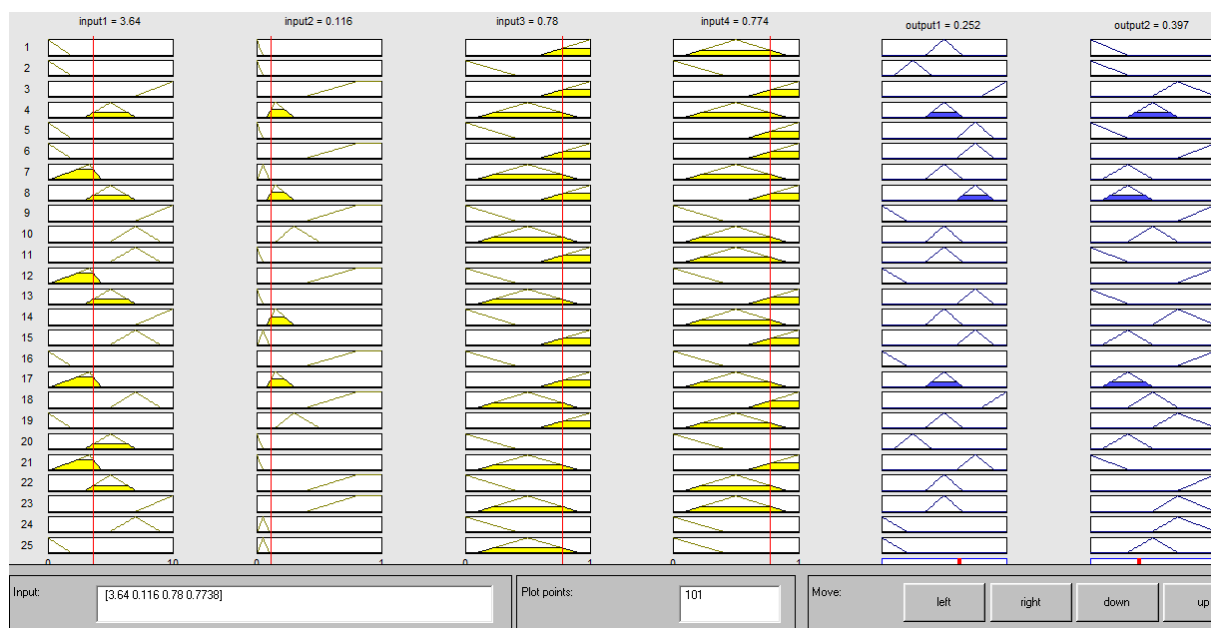


Рис. 5. Окно нечеткого вывода в среде MATLAB при оценке инвестиций в спортивную область

Для общего анализа разработанной нечеткой модели также может оказаться полезной визуализация соответствующей поверхности нечеткого вывода (рис. 6). Данная поверхность нечеткого вывода позволяет установить зависимость значений выходной переменной от значений отдельных входных переменных нечеткой модели. Анализ этих зависимостей может служить основанием для изменения функций принадлежности входных переменных или нечетких правил с целью повышения адекватности системы нечеткого вывода для конкретных стратегий инвестирования в спортивной сфере.

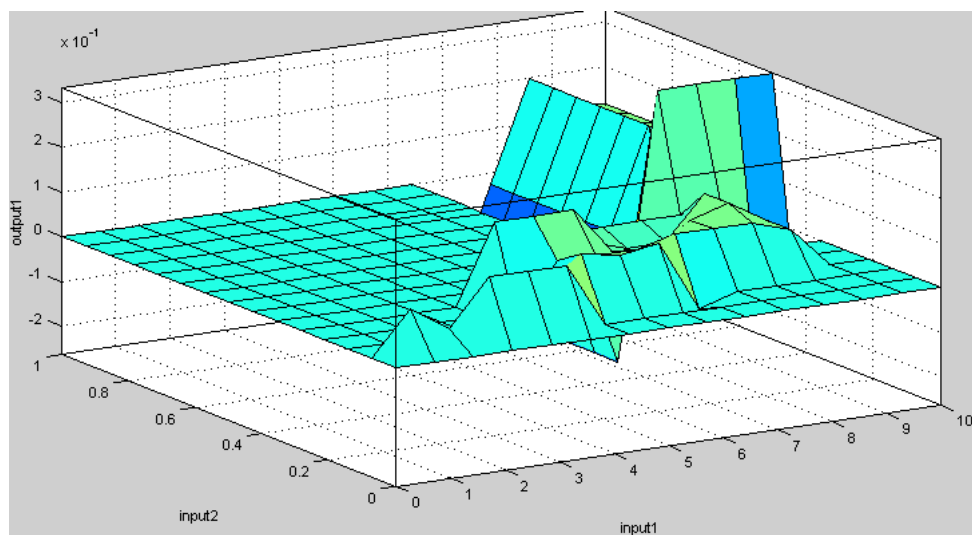


Рис. 6. Зависимость переменной «Доход» от переменных «Время выполнения ИП» и «Сумма инвестиций»

Следует отметить то обстоятельство, что разработанная нечеткая модель имеет несколько упрощенный характер по сравнению с реально используемой в сложившейся практике оценки инвестиционных проектов. В то же время рассмотренная нечеткая модель обладает достаточно высокой адекватностью, что обуславливает ее успешное применение для оценивания ИП в спортивной сфере.

Использование разработанного методического подхода оценки инвестиционных проектов может повысить эффективность распределения и использования инвестиционных ресурсов региона. Одно из важнейших преимуществ методики заключается в том, что она

лучше традиционных аналогов позволяет работать в условиях неопределённости, отсутствия чётких статистических данных и достаточно обоснованных прогнозов, что нередко можно встретить в российской инвестиционной практике. Подход с использованием нечёткой логики позволяет также адекватно оценивать инвестиционные проекты в сферах с особенно трудно прогнозируемым конечным результатом деятельности (в статье рассмотрен спортивный пример, однако, исходя из данного критерия, очевидно, что область применения нечётких моделей оценки ИП может быть значительно шире). Как нам представляется, сильные стороны предложенной методики позволяют ей рассчитывать на «права гражданства» в экономической практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nedosekin A. Fuzzy Financial Management / A. Nedosekin. Russia, Moscow: Afa library, 2003. 184 p.
2. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.

Томашевский Евгений Юрьевич –
аспирант кафедры финансов
Саратовского государственного
социально-экономического университета
Митяшин Никита Петрович –
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Системотехника»
Саратовского государственного
технического университета

Tomashevskiy Evgeny Yuryevich –
Post-graduate Student of the Department
of Finance Saratov State Socio
Economic University
Mityashin Nikita Petrovich –
Doctor of Technical Sciences Professor,
Professor of the Department of «System Engi-
neering» Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.2011, 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.