ВЕСТНИК

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ
НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

БРЯНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 2 (50) 2016

Издается с 2004 года

DOI 10.12737/ISSN.1999-8775

АПРЕЛЬ - ИЮНЬ

Учредитель и издатель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Брянский государственный технический университет» (БГТУ)

Председатель редакционного совета - **Федонин О.Н.,** *д-р техн. наук, проф.*
Заместитель председателя редакционного совета **Сазонов С.П.,** *канд. техн. наук, проф.*

Редакционный совет:
Аверченков В.И., *д-р техн. наук, проф. (Брянск)*
Албагачиев А.Ю., *д-р техн. наук, проф. (Москва)*
Бабичев А.П., *д-р техн. наук, проф. (Ростов-на-Дону)*
Безъязычный В.Ф., *д-р техн. наук, проф. (Рыбинск)*
Блурцян Д.Р., *д-р техн. наук, проф. (Швеция)*
Бухач А., *д-р техн. наук, проф. (Польша)*
Вайнер Л.Г., *д-р техн. наук, доц. (Хабаровск)*
Горленко О.А., *д-р техн. наук, проф. (Брянск)*
Ерохин Д.В., *канд. экон. наук, проф.* (*Брянск)*
Ивахненко А.Г., *д-р техн. наук, проф. (Курск)*
Клименко С.А., *д-р техн. наук, проф. (Украина)*
Кобищанов В.В., *д-р техн. наук, проф. (Брянск)*
Константинов И.С., *д-р техн. наук, проф. (Белгород)*
Мокрицкий Б.Я., *д-р техн. наук, проф. (Комсомольск-на-Амуре)*
Пестер А., *д-р техн. наук, проф. (Австрия)*
Петрешин Д.И., *д-р техн. наук, проф. (Брянск)*
Протасьев В.Б., *д-р техн. наук, проф. (Тула)*
Савин Л.А., *д-р техн. наук, проф. (Орел)*
Смоленцев В.П., *д-р техн. наук, проф. (Воронеж)*
Соловьев Д.Л., *д-р техн. наук, проф. (Муром)*
Степанов Ю.С., *д-р техн. наук, проф. (Орел)*
Суслов А.Г., *д-р техн. наук, проф. (Москва)*
Хандожко А.В., *д-р техн. наук, проф. (Брянск)*
Хейфец М.Л., *д-р техн. наук, проф. (Беларусь)*
Янюшкин А.С., *д-р техн. наук, проф. (Братск)*

Редколлегия
Главный редактор - **Киричек А.В.,** *д-р техн. наук, проф.*
Заместитель главного редактора - **Морозова А.В.,** *канд. соц. наук*
Ответственный секретарь - **Татаринцев В.А.,** *канд. техн. наук*
Корректор - **Ерохина В.А.**
Редактор - **Щербакова М.Л.**

Адрес редакции
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
(4832) 58-82-77
Сайт: http://vestnik.tu-bryansk.ru
E-mail: vestnik@tu-bryansk.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство ПИ № ФС77-21709 от 17 августа 2005 года

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении или непосредственно в редакции журнала. Индексы по каталогу **«Пресса России»**:
18945 – полугодовая; **15621** – годовая

Журнал включен в специализированный референтный библиографический сервис CrossRef

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по направлениям 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение, 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление, 05.16.00 – Металлургия и материаловедение, 05.22.00 – Транспорт, 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности)

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Вестник Брянского государственного технического университета», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

© Брянский государственный технический университет, 2016

BULLETIN of BRYANSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SCIENTIFIC TECHNICAL JOURNAL

Issued since 2004

DOI 10.12737/ISSN.1999-8775

№ 2 (50) 2016

APRIL-JUNE

Founder and Publisher – Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
"Bryansk State Technical University" (BSTU)

Chairman of Editorial Council – **O.N. Fedonin,** *D.Eng., Prof.*
Vice-Chairman of Editorial Council – **S.P. Sazonov,** *Can.Eng., Prof.*

Editorial Council:
V.I. Averchenkov, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*
A.Yu. Albagachiev, *D.Eng., Prof., (Moscow)*
A.P. Babichev, *D.Eng., Prof., (Rostov-upon-Don)*
V.F. Bezyazychny, *D.Eng., Prof., (Rybinsk)*
D.R. Blurtsyan, *D.Eng., Prof., (Sweden)*
A. Bukhach, *D.Eng., Prof., (Poland)*
L.G. Vainer, *D.Eng., Assistant Prof., (Khabarovsk)*
O.A. Gorlenko, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*
V.D. Erokhin, *PhD.Econ., Prof., (Bryansk)*
A.G. Ivakhnenko, *D.Eng., Prof., (Kursk)*
S.A. Klimenko, *D.Eng., Prof., (Ukraine)*
V.V. Kobishchanov, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*
I.S. Konstantinov, *D.Eng., Prof., (Belgorod)*
B.Ya. Mokritsky, D.Eng., Prof., *(Komsomolsk-upon Amur)*
D.I. Petreshin, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*
V.B. Protasiev, *D.Eng., Prof., (Tula)*
A. Pester, *D.Eng., Prof., (Austria)*
L.A. Savin, *D.Eng., Prof., (Orel)*
V.P. Smolentsev, *D.Eng., Prof., (Voronezh)*
D.L. Solovyov, *D.Eng., Prof., (Murom)*
Yu.S. Stepanov, *D.Eng., Prof., (Orel)*
A.G. Suslov, *D.Eng., Prof., (Moscow)*
A.V. Khandozhko, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*
M.L. Kheifits, *D.Eng., Prof., (Belarus)*
A.S. Yanyushkin, *D.Eng., Prof., (Bratsk)*

Editorial Board:
Editor-in-Chief – **A.V. Kirichek**, *D.Eng., Prof.*
Deputy Editor-in-Chief – **A.V. Morozova,** *Can.Sociol. Sc.*
Executive Secretary – **V.A. Tatarintsev**, *Can.Eng.*
Proof-reader – **V.A. Yerokhina**
Editor – **M.L. Shcherbakova**

Editorial Office Address:
7, 50 years of October Boulevard, Bryansk, 241035, Russia
Phone: (4832) 58-82-77
Site: http://vestnik.tu-bryansk.ru
E-mail: vestnik@tu-bryansk.ru

A journal is registered in Federal Service for supervision of law observance in mass communications and cultural heritage protection. Certificate ПИ № ФС77-21709 of August 17, 2005

A journal is spread through a subscription which may be drawn up in any post-office or directly in the editorial office of the journal. Indices on the catalogue "**Russia Press**": **18945** – for semi-annual subscription; **15621** – for annual subscription

Journal is included in a specialized consultant bibliographical service CrossRef

Reprinting, all kinds of material copying and reproduction of materials published in the journal "Bulletin of Bryansk State technical University" is allowed only with the Editorial Board's permission and a reference to the source of information

© **Bryansk State Technical University, 2016**

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Трение и износ

Friction and wear

Бишутин С.Г., Суслов А.Г. Математическое моделирование процесса изнашивания шлифованных поверхностей трения	6	**S.G. Bishutin, A.G. Suslov.** Mathematical modeling of ground friction surface wear process
Савин Л.А., Сытин А.В., Тюрин В.О. Смазка лепестковых газодинамических подшипников маловязкими криогенными жидкостями	13	**L.A. Savin, A.V. Sytin, V.O. Tyurin.** Lubrication of tulip gas bearings by low-viscous cryogenic liquids
Памфилов Е.А., Прозоров Я.С., Кузнецов С.В., Лукашов С.В. Особенности исследования коррозионно-механического изнашивания в условиях трения скольжения	21	**E.A. Pamfilov, Ya.S. Prozorov, S.V. Kuznetsov, S.V. Lukashov.** Investigation peculiarities of mechanochemical wear under conditions of sliding friction
Шец С.П., Сакало В.И. Влияние смазочного материала на процессы, протекающие в подшипниках качения	31	**S.P. Shets, V.I. Sakalo.** Influence of lubricant on processes, proceeding in rolling bearings
Шец С.П., Сакало В.И., Суслов А.Г. Взаимосвязь герметичности подшипниковых узлов трения с абразивным изнашиванием их трибосопряжений	36	**S.P. Shets, V.I. Sakalo, A.G. Suslov.** Correlation of bearing friction assemblies with abrasive wear of their tribo-coupling
Панайоти В.А. Исследование влияния твердой смазки на поверхностное упрочнение инструментов из быстрорежущей стали при заточке	41	**V.A. Panayoty.** Analysis of solid lubrication effect upon surface hardening of high-speed steel tools during sharpening
Матлахов В.П., Игнатов А.Н., Суслов А.Г. Разработка программного модуля для определения процентного состава компонентов износостойких покрытий	46	**V.P. Matlakhov, A.N. Ignatov, A.G. Suslov.** Software module development for definition of percentage composition in antiwear coatings
Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Тарасов Д.Е. Повышение долговечности деталей машин комбинированной упрочняющей обработкой	52	**A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov, D.E. Tarasov.** Machinery life increase by combined strengthening

Машиностроение и транспорт

Mechanical engineering and transport

Петрешин Д.И., Федонин О.Н., Хандожко А.В. Автоматизация управления параметрами качества поверхностного слоя деталей машин в условиях неопределенности	59	**D.I. Petreshin, O.N. Fedonin, A.V. Khandozhko.** Automation of quality parameter control of machinery surface layer under conditions of uncertainty
Дроконов А.М. Исследование вибрации газоперекачивающих агрегатов с судовым газотурбинным приводом	64	**A.M. Drokonov.** Vibration investigations of gas-compressor units with marine gas turbine drive
Цуканова Е.С. Анализ стержневых систем методом конечных элементов при ударной нагрузке с применением динамического элемента	68	**C.S. Tsukanova.** Rod systems analysis by finite element method at load impact with use of dynamic element
Тулубенский Е.В., Дроконов А.М., Осипов А.В. Снижение интенсивности подковообразных вихрей в сопловых аппаратах турбомашин	78	**E.V. Tulubensky, A.M. Drokonov, A.V. Osipov.** Intensity decrease of horseshoe whirlwinds in nozzle instruments of turbomachines
Синицын В.В., Кобищанов В.В. Определение условий применения унифицированной тормозной рычажной передачи с цилиндрами ТЦР в тормозных системах грузовых четырехосных вагонов	85	**V.V. Sinitsyn, V.V. Kobishchanov.** Condition definition for application of uniform brake rigging with cylinders (bcr) in brake systems of fright eight-wheel cars
Сливинский Е.В., Радин С.Ю., Митина Т.Е. Исследование колебаний стержня адаптивной торсионной рессоры для рессорного подвешивания трёхосных тележек тепловозов	90	**E.V. Slivensky, S.Yu. Radin, T.E. Mitina.** Rod oscillation investigation of adaptive torsion spring for spring suspension of six-wheel locomotive bogies
Тихомиров В.П., Стриженок А.Г. Методика выбора материала для зубчатых колес	99	**V.P. Tikhomirov, A.G. Strizhenok.** Methods of material choice for cog-wheels
Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В. Исследование закономерностей формирования точностных параметров деталей при прототипировании	104	**M.Yu. Kulikov, M.A. Larionov, D.V. Gusev.** Analysis of regularities in accuracy parameters formation at prototyping

Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В. Исследование взаимосвязи шероховатости поверхности прототипированных образцов с условиями их базирования при изготовлении	108	**M.Yu. Kulikov, M.A. Larionov, D.V. Gusev.** Correlation investigation of surface roughness in prototyped samples with conditions of their location at manufacturing
Бутенко В.И., Гусакова Л.В., Кулинский А.Д. Перспективные направления повышения эффективности шлифования поверхностей деталей машин	112	**V.I. Butenko, L.V. Gusakova, A.D. Kulinsky.** Promising directions to increase grinding efficiency in machine parts surfaces
Гадалов В.Н., Фролов А.В., Муравьев В.И., Ворначева И.В., Розина Т.Н. Уточнение эффективности стандартной термической обработки стали марки 30ХГСА	121	**V.N. Gadalov, A.V. Frolov, V.I. Muraviyov, I.V. Vornacheva, T.N. Rosina.** Efficiency adjustment of standard thermal treatment of 30hgsa steel
Миронова Е.А. Обеспечение стабильности затяжки резьбовых соединений многошпиндельными гайковертами с пассивной адаптацией по моменту	129	**E.A. Mironova.** Stability ensuring in threaded connection tightening by multispindle nutrunners with passive adaptation on moment
Серга Г.В., Лебедев В.А., Белокур К.А., Яковлев Д.Я. Роторно-винтовые технологические системы обработки деталей	132	**G.V. Serga, V.A. Lebedev, K.A. Belokur, D.Ya. Yakovlev.** Rotary-helical technological systems for parts machining
Можегова Ю. Н. Автоматизированный неразрушающий контроль пористости материалов	138	**Yu.N. Mozhegova.** Computerized nondestructive check of material porosity
Жижкина Н.А. Оптимизация технологии изготовления центробежнолитых валков	143	**N.A. Zhizhkina.** Technology optimization for centrifugal-cast roll manufacturing

Вычислительная техника и информационные технологии

Computer engineering and information technology

Аверченков В.И., Самсоненко А.С. Автоматизация управления оптической инспекцией при контроле качества пайки печатных узлов	149	**V.I. Averchenkov, A.S. Samsonenko.** Automation of optic inspection control at quality management of printed circuit assembly soldering
Лемешева Е.В., Тихомиров П.В., Атрощенко А.М., Булхов Н.А., Измеров М.А. Нейрокомпьютерное моделирование контактной жесткости	156	**E.V. Lemesheva, P.V. Tikhomirov, A.M. Atroshchenko, N.A. Bulkhov, M.A. Izmerov.** Neurocomputer modeling of contact rigidity
Рытов М.Ю., Шпичак С.А. Метод обеспечения доступа к информационно-технологическим ресурсам автоматизированной системы управления предприятиями водоснабжения	167	**M.Yu. Rytov, S.A. Shpichak.** Method ensuring access to information technological resources of automatic control system by water supply company
Аверченков А.В., Аверченкова Е.Э., Аксененко Д.В. Алгоритмы и порядок проведения экспертизы по оценке влияния внешней среды на региональную социально-экономическую систему для формирования базы знаний советующей информационной системы	175	**A.V. Averchenkov, E.E. Averchenkova, D.V. Aksyonenko.** Algorithms and order of examination carrying out on estimate of environment effect upon regional social-economic system for knowledge base formation of corresponding information system
Колпаков А.А., Кропотов Ю.А. Алгоритм повышения производительности гетерогенных многопроцессорных вычислительных систем	186	**A.A. Kolpakov, Yu.A. Kropotov.** Algorithm for efficiency increase of heterogeneous multi-processor computer systems
Шинаков К.Е., Рытов М.Ю., Голембиовская О.М., Чиркова К.Ю. Оценка риска безопасности информационных систем, обрабатывающих конфиденциальную информацию	193	**K.E. Shinakov, M.Yu. Rytov, O.M. Golembiovskaya, K.V. Chirkova.** Safety risk assessment of information systems processing confidential information
Рытов М.Ю., Лексиков Е.В., Ковалев П.А. Использование нечеткого когнитивного моделирования для проведения аудита информационной безопасности информационных порталов региональных органов исполнительной власти	201	**M.Yu. Rytov, E.V. Leksikov, P.A. Kovalyov.** Fuzzy cognitive modeling application for carrying out of information safety audit of information portals of regional exacutive authoritie
Якимов А.И., Якимов Е.А., Аверченков В.И., Ивкина Н.Н. Оптимизационная задача управления построением имитационной модели в корпоративной информационной системе	207	**A.I. Yakimov, E.A. Yakimov, V.I. Averchenkov, N.N. Ivkina.** Optimization problem of control by simulation model formation in corporate information system
Шалыгин М.Г., Сафонов А.Л. Автоматизация триботехнических испытаний с применением DAQ-технологий	215	**M.G. Shalygin, A.L. Safonov.** Tribotechnical test automation using DAQ-techniques

Серебренникова А.Г., Козлова М.А., Харина О.П. Программно-аппаратная реализация определения оптимальной скорости резания при обработке труднообрабатываемых материалов 222

A.G. Serebrennikova, M.A. Kozlova, O.P. Kharina. Firmware realization for optimum cutting speed definition at hard-to-machine material working

Экономика и менеджмент

Economics and management

Стрижакова Е.Н. Показатели оценки эффективности использования ресурсов промышленных предприятий 232

E.N. Strizhakova. Efficiency indices of resource use at industrial enterprises

УДК 621.891
DOI: 10.12737/20236

ТРЕНИЕ И ИЗНОС

С.Г. Бишутин, А.Г. Суслов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ШЛИФОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Представлена математическая модель изнашивания поверхности, имеющей отклонение формы и расположения, шероховатость, волнистость и сформированный при финишной абразивной обработке поверхностный слой. Приведены результаты триботехнических испытаний шлифованных стальных поверхностей.

Ключевые слова: поверхность трения, скорость изнашивания поверхности, математическое моделирование, абразивная обработка.

S.G. Bishutin, A.G. Suslov

MATHEMATICAL MODELING OF GROUND FRICTION SURFACE WEAR PROCESS

Many factors affecting considerably surface wear cannot be taken into account within the bounds of existing approaches to the mathematical description of this process. It is well-known that the modes of finish grinding have a significant influence upon wear resistance of a friction surface. It is explained, for example, by differences in a structural – phase state of a surface layer formed in the course of thermal and force impact of abrasion. Therefore, for reliable forecasting of the resource of many tribo-couplings it is necessary to estimate friction surface wear resistance taking into account the influence of conditions and modes of finishing abrasion.

The mathematical modeling of the process under consideration allowed obtaining an equation for the computation of a wear rate of run-in ground friction surfaces and non-run-in ones in which pressure in a contact, slip velocity, abrasion modes, form errors in a friction surface and also a state of a surface layer and a position error of a friction surface in a coupling are taken into account.

Experimental researches have confirmed a possibility of use in practice the mathematical dependences obtained.

The researches carried out allow forecasting more reliably ground friction surface wear of machinery and mechanisms.

Key words: friction surface, surface wear velocity, mathematical modeling, abrasion.

Несмотря на успехи, достигнутые современной трибологией, проблему моделирования процесса изнашивания нельзя считать решенной. Множество факторов, существенно влияющих на изнашивание поверхности, невозможно учесть в рамках существующих подходов к математическому описанию данного процесса. Так, результаты исследований [1;2] показали, что режимы финишного шлифования оказывают значительное влияние на износостойкость поверхностей трения. Скорость изнашивания таких поверхностей при варьировании режимов обработки может меняться в 1,5 – 3 раза. Это объясняется различиями структурно-фазового состояния материала поверхностного слоя, формируемого в ходе термического и силового воздействия абразивной обработки. Поэтому для достоверного прогнозирования ресурса трибосопряжений необходимо оценивать износостойкость поверхностей трения с учетом влияния условий и режимов финишной абразивной обработки.

Рассмотрим подвижный контакт двух поверхностей, имеющих макроотклонения, волнистость и шероховатость (рис. 1). Контактирующие поверхности 1 и 2 прижаты силой P и перемещаются друг относительно друга с постоянной скоростью V. Между поверхностями в пределах некоторой площади A образуются пятна контакта 3, на которых возникают фрикционные связи, приводящие к отделению частиц

материала с одной или двух поверхностей. Объем отделяемого материала зависит от конкретных условий изнашивания и может определяться нанообъемами (перенос группы атомов в ходе механохимических процессов, наблюдаемых при трении) и макрообъемами (вырывы материала с по-

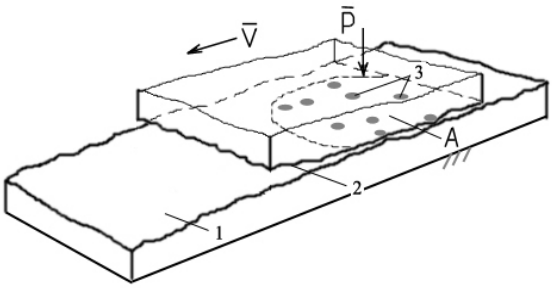


Рис. 1. Подвижный контакт двух поверхностей

верхности при заедании). Отделение частиц материала приводит к износу контактирующих поверхностей. Износостойкость поверхностей деталей оценивают величиной, обратной интенсивности или скорости изнашивания.

Получим уравнения для скоростей изнашивания контактирующих поверхностей. Износ поверхности на некоторую величину h в единицу времени произойдет, если с части A этой поверхности трения, на которой образуются пятна контакта (рис. 1), отделится объем материала, равный hA. При этом скорость изнашивания поверхности

$$\gamma = h\frac{\nu S}{A}, \qquad (1)$$

где h – средняя толщина материала, удаляемого за одно нарушение фрикционной связи; ν – частота возникновения фрикционных связей в пределах поверхности трения в единицу времени; S – площадь пятен контакта, охваченная фрикционными связями; A – часть площади поверхности трения, в пределах которой возникают пятна контакта.

Уравнение для расчета частоты возникновения фрикционных связей можно представить в виде

$$\nu \approx k_\nu \left(\frac{\tau_п}{\tau_c}\right)^w nV, \qquad (2)$$

где k_ν – размерный коэффициент пропорциональности; $\tau_п$ – время существования пятна контакта; τ_c – время существования фрикционной связи [3]; w – показатель степени; n – число пятен контакта на поверхности трения; V – скорость скольжения.

При изнашивании поверхности о закрепленный абразив $\tau_п / \tau_c = 1$.

Учитывая, что число n пятен контакта увеличивается с увеличением нагрузки P (при ненасыщенном контакте) [4], уравнение (2) можно записать следующим образом:

$$\nu \approx k_\nu \left(\frac{\tau_п}{\tau_c}\right)^w k_n PV, \qquad (3)$$

где k_n – коэффициент пропорциональности между величинами n и P.

Часть A поверхности трения, на которой образуются пятна контакта, можно выразить как

$$A = A_a t_p, \qquad (4)$$

где A_a – площадь поверхности трения; t_p – доля поверхности трения, на которой образуются пятна контакта (меняется с течением времени t).

$$t_p \approx \begin{cases} b\left(\dfrac{y + k_t \gamma t}{H}\right)^a, & y + k_t \gamma t < H; \\ 1, & y + k_t \gamma t \geq H, \end{cases} \qquad (5)$$

где y – сближение поверхностей трения под нагрузкой P в начальный момент времени t=0 (зависит от контактной жесткости поверхностей); a, b – параметры аппроксимации значений t_p степенной функцией; k_t – коэффициент, учитывающий взаимосвязь γ и t; H – величина, учитывающая макроотклонение, волнистость, шероховатость и погрешность положения поверхности в паре трения (рис. 2).

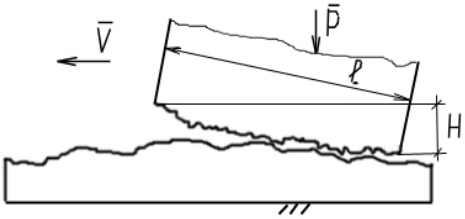


Рис. 2. Схема к определению величины H

Для конкретной пары трения H определяется индивидуально, так как степень влияния перечисленных факторов в каждом случае различна. Если одна из поверхностей трения значительно меньше другой, то можно рекомендовать следующую зависимость для расчета H:

$$H=\sqrt{\Delta^2+H_{max}^2+\left(W_{max}+R_{max}\right)^2}.$$

Здесь H_{max}, W_{max}, R_{max} – соответственно макроотклонение (отклонение формы), волнистость и шероховатость меньшей из поверхностей трения; Δ – погрешность положения поверхности в паре трения или сборочном узле.

Отметим, что параметры a, b, H_{max}, W_{max}, R_{max} и Δ определяются технологией сборки узла трения и финишной обработки рассматриваемой поверхности.

При подстановке (2 – 4) в (1) получим

$$\gamma = hS\ k_\nu\left(\frac{\tau_п}{\tau_c}\right)^w k_n\frac{PV}{A_a t_p} = V_m k_\nu\left(\frac{\tau_п}{\tau_c}\right)^w k_n\frac{pV}{t_p}, \qquad (6)$$

где $V_m = hS$ – объем материала, удаляемого с поверхности трения за одно нарушение фрикционной связи (зависит от вида изнашивания и структурно-фазового состояния поверхностного слоя); $p = P/A_a$ – давление на поверхности трения.

Как правило, контактные перемещения поверхностей значительно меньше их износов. Тогда уравнение (6) с учетом (5) для неприработанных поверхностей можно представить следующим образом:

$$\gamma = k_\gamma (pV)^{\frac{1}{1+a}} (k_t t)^{-\frac{a}{1+a}} (H/b)^{\frac{a}{1+a}}. \qquad (7)$$

Величина $k_\gamma = k_\nu\ k_n\ (\tau_п/\tau_c)^w\ V_m$ является коэффициентом, характеризующим износостойкость поверхности трения, и зависит от условий финишной абразивной обработки.

Анализ формулы (7) показывает, что скорость изнашивания является степенной зависимостью произведения pV и гиперболической зависимостью от времени t работы сопряжения. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований многих ученых [3-8 и др.].

При достижении износа, равного H, поверхность полностью прирабатывается и скорость изнашивания определяется уравнением

$$\gamma = k_\gamma pV. \qquad (8)$$

Такой вид закона изнашивания приработанных поверхностей согласуется с результатами исследований А.С. Проникова, М.М. Хрущова, Д. Арчарда, Д.Г. Эванса, Д.К. Ланкастера и др.

Для определения скорости изнашивания второй (сопряженной) поверхности трения необходимо в формулах (7) и (8) произведение pV умножить на коэффициент, учитывающий размеры поверхности трения. Так, для пар трения с возвратно-поступательным перемещением поверхностей данный коэффициент равен l/L, где l, L – длины поверхностей трения в направлении перемещений. Отметим, что в эти формулы необходимо подставлять величины a, b, H и k_γ, которые характеризуют состояние сопряженной поверхности трения.

Уравнение (8) можно представить в виде

$$\gamma = ckpV\ ,$$

где c – размерный коэффициент, зависящий от условий изнашивания поверхности; k – безразмерный коэффициент износостойкости материала поверхностного слоя детали пары трения.

Значение k будет определяться структурно-фазовым состоянием материала поверхностного слоя, зависящим от условий и режимов финишной абразивной

обработки. Получим формулу для расчета коэффициента k.

Анализ процесса абразивной обработки показал, что существует четыре фактора, в наибольшей степени определяющие структурно-фазовое состояние поверхностного слоя: $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформирования материала в ходе обработки, c^{-1}; a_z – глубина внедрения вершин абразивных зерен в обрабатываемый материал, м; ρ – радиус скругления вершин абразивных зерен, м; λ – интенсивность контактирования рассматриваемого участка поверхности заготовки с абразивным инструментом, c^{-1}. Эти факторы комплексно характеризуют термическое и силовое воздействия абразивной обработки, формирующие поверхностный слой [1;2;9;10].

Запишем уравнение размерности величины k, полагая, что существует однозначная взаимосвязь между k и $\dot{\varepsilon}$, a_z, λ, ρ.

$$L^0T^0 = (T^{-1})^{\alpha}(L)^{\beta}(T^{-1})^{\delta}(L)^{\varphi}, \qquad (9)$$

где T – время; L – длина ; α, β, δ, φ – постоянные числа.

Из уравнения (9) следует, что α = -δ и β = -φ. Тогда формулу для k можно представить в виде

$$k = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\lambda}\right)^{\alpha}\left(\frac{a_z}{\rho}\right)^{\beta}. \qquad (10)$$

Величина $\lambda = \omega H$, где ω – частота вращения заготовки или число рабочих ходов абразивного инструмента в единицу времени; H – число контактов рассматриваемого участка поверхности заготовки со шлифовальным кругом.

Таким образом, величина k в полной мере отражает влияние режимов финишной абразивной обработки на износостойкость поверхности.

Для определения значений α и β были использованы результаты экспериментов, представленные в [1;2]. Часть этих результатов представлена в таблице.

Таблица

Условия обработки и износостойкость стальных шлифованных поверхностей образцов

Материал (твердость)	Глубина шлифования, мкм	Время выхаживания, мин	Износ образца, мкм	Скорость изнашивания, мкм/ч
Сталь 45 (HB 200…220)	20	0	17,0	1,70
		5	9,5	0,95
	6	0	12,0	1,20
		5	6,3	0,63
Сталь 12ХН3А (HRC 58…62)	6	0	3,4	0,34
		5	2,2	0,22
Сталь 45 (HRC 46…50)	20	0	4,8	0,78
		5	3,5	0,35
	6	0	3,7	0,37
		5	2,9	0,29
Сталь 12Х18Н10Т (HB 190…210)	20	0	37,0	3,70
		5	15,5	1,55
	6	0	18,0	1,80
		5	14,0	1,40
Сталь 35ХГСА (HRC 40…45)	20	0	8,2	0,82
		5	3,9	0,39
	6	0	4,7	0,47
		5	3,2	0,32

Примечания: 1. Испытания проводились на машине трения МИ-1М по схеме «вращающийся диск - невращающийся твердосплавный индентор» при нагрузке на индентор 150 Н и скорости скольжения 1,3 м/с. 2. В качестве смазочного материала использовалось масло И-20А.

Анализ полученных результатов показывает, что коэффициент k имеет тесную корреляцию (коэффициент парной корреляции Q = 0,89) со скоростью изнашивания поверхности (рис. 3). Можно установить, что α = 0,2 и β = 1,5. Тогда уравнение (10) применительно к условиям экспериментов имеет вид

$$k = \left(\dot{\varepsilon}/\lambda\right)^{0,2}\left(a_z/\rho\right)^{1,5};$$

$$3,5\cdot 10^3 \le \dot{\varepsilon}/\lambda \le 9\cdot 10^6;\ 0,25 \le a_z/\rho \le 0,75.$$

Значения $\dot{\varepsilon}/\lambda$ и a_z/ρ можно рассчитать по формулам [9;10].

Последнее уравнение позволяет оценивать износостойкость поверхности с учетом условий и режимов финишной абразивной обработки.

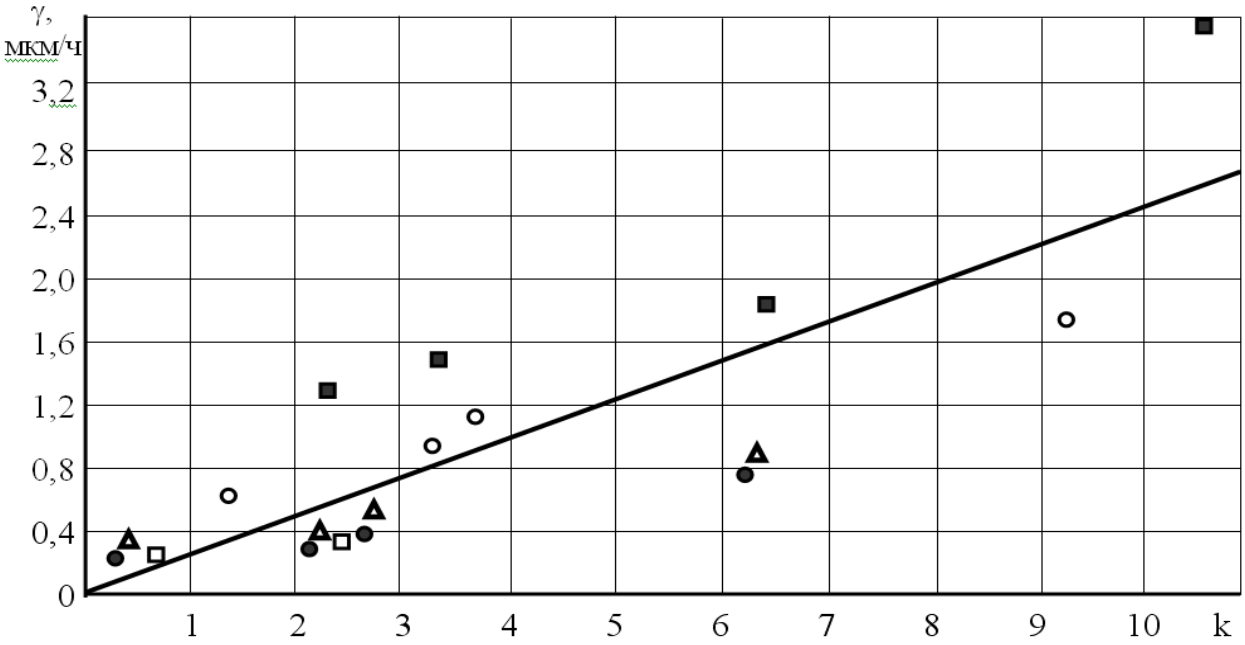


Рис. 3. Взаимосвязь скорости изнашивания γ и коэффициента износостойкости k материала поверхностного слоя: □– сталь 12ХН3А (HRC 58…62); ○- сталь 45 (HB 200…220); ■ – сталь 12Х18Н10Т (HB 190…210); ●– сталь 45 (HRC 46…50); ▲ – сталь 35ХГСА (HRC 40…45)

Таким образом, полученные результаты позволяют:

- достоверно и оперативно оценивать износостойкость поверхностей, сформированных при абразивной обработке;
- целенаправленно выбирать режимы шлифования с учетом требуемой износостойкости поверхности.

Предложенная математическая модель процесса изнашивания имеет следующие преимущества перед существующими аналогами:

- модель справедлива для основных видов изнашивания подвижных сопряжений, поскольку различные механизмы разрушения поверхности трения могут быть учтены изменением коэффициента k_γ;
- напрямую учитывается совместное влияние давления в контакте и скорости скольжения на скорость изнашивания поверхности;
- в рамках данной модели одной и той же совокупностью уравнений описываются период приработки и нормальное изнашивание поверхности;
- учитываются погрешности поверхности трения, образующиеся при ее обработке, а также состояние поверхностного

слоя и погрешность положения поверхности трения в сопряжении;

- появляется возможность учета влияния на износ термодеформационных процессов при трении путем прогнозирования частоты образования фрикционных связей на пятнах контакта.

Проведенные исследования позволяют более достоверно прогнозировать износ шлифованных поверхностей трения деталей машин и механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бишутин, С.Г. Износостойкость сформированных при шлифовании поверхностных слоев деталей машин: монография/ С.Г. Бишутин, М.И. Прудников; под ред. С.Г. Бишутина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 100 с.
2. Бишутин, С.Г. Качество и износостойкость шлифованных поверхностей деталей автомобилей/ С.Г. Бишутин. – Брянск: Десяточка,2011. – 100 с.
3. Громаковский, Д.Г. Физические основы, механика и технические приложения трибологии: курс лекций для техн. вузов/ Д.Г. Громаковский. – М.:Машиностроение, 2006. – 266 с.
4. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для техн. вузов/ А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше [и др.]; под общ. ред. А.В.Чичинадзе. – М.:Машиностроение, 2001. – 664 с.
5. Крагельский, И.В. О расчете износа поверхностей трения/ И.В. Крагельский, Г.М. Харач//Расчетные методы оценки трения и износа: сб. науч. тр. – Брянск: Приок. кн. изд-во, Брян. отд-ние, 1975. – С.5-47.
6. Крагельский, И.В. Узлы трения машин / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
7. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии/ Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с.
8. Основы трибологии: учеб. для техн. вузов/ под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Наука и техника, 1995. – 778 с.
9. Бишутин, С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании / С.Г. Бишутин. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 144 с.
10. Бишутин, С.Г. Структурирование поверхностных слоев деталей при финишной абразивной обработке/ С.Г. Бишутин. – Брянск:БГТУ, 2009. – 100 с.

1. Bishutin, S.G. Wear Resistance of Machinery Surface Layers Formed at Grinding: Monograph/ S.G. Bishutin, M.I. Prudnikov; under the editorship of S.G. Bishutin. – Bryansk: BSTU, 2010. – pp.100.
2. Bishutin, S.G. Quality and Wear Resistance of Ground Surfaces in Motor Car Parts/ S.G. Bishutin. – Bryansk: Desyatochka, 2011. – pp. 100.
3. Gromakovsky, D.G. Physical fundamentals, mechanics and technical applications of tribology: Lecture Course for Technical Colleges/ D.G. Gromakovsky. – M.: Mechanical Engineering, 2006. – pp. 266.
4. Chichnadze, A.V. Fundamentals of Tribology (Friction, Wear, Lubrication): Textbook of Technical Colleges/ A.V. Chichnadze, E.D. Brown, N.A. Bushe [et al.]; under the general editorship of A.V. Chichnadze. – M.: Mechanical Engineering, 2001. – pp. 664.
5. Kragelsky, I.V. On wear computation of friction surfaces / I.V. Kragelsky, G.M. Kharach//Computation Methods for Friction and Wear Estimate: Proceedings - Bryansk: Prioksk. Publishing House, Bryansk Branch, 1975. – pp. 5-47.
6. Kragelsky, I.V. Machinery Friction Units / I.V. Kragelsky, N.M. Mikhin. – M.: Mechanical Engineering, 1984. – pp. 280.
7. Myshkin, N.K. Friction, Lubrication, Wear. Physical Fundamentals and Technical Applications of Tribology/ N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. – M.: Physmathlit, 2007. – pp. 368.
8. Tribology Fundamentals: Textbook for Technical Colleges/ under the editorship of A.V. Chichnadze. – M.: Science and Technics, 1995. – pp. 778.
9. Bishutin, S.G. Assurance of Required Quality Parameter Totality for Parts at Grinding / S.G. Bishutin. – M.: Mechanical Engineering-1, 2004. – pp. 144.
10. Bishutin, S.G. Surface Layer Structuring of Parts at Finish Abrasion/ S.G. Bishutin. – Bryansk: BSTU, 2009. – pp. 100.

Статья поступила в редколлегию 4.04.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Киричек А.В.

Сведения об авторах:

Бишутин Сергей Геннадьевич, д. т. н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 51-19-97.
Суслов Анатолий Григорьевич, д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, тел.: (4832) 51-19-97.

Bishutin Sergey Gennadievich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Motor Transport” Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 51-19-97.
Suslov Anatoly Grigorievich, D.Eng., Prof. of Bauman State Technical University of Moscow, Phone: (4832) 51-19-97.

УДК 621.822.575: 621.892.9 – 032.1
DOI: 10.12737/20238

Л.А. Савин, А.В. Сытин, В.О. Тюрин

СМАЗКА ЛЕПЕСТКОВЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ МАЛОВЯЗКИМИ КРИОГЕННЫМИ ЖИДКОСТЯМИ

Рассмотрена возможность применения маловязких криогенных жидкостей в качестве смазочных материалов для лепестковых газодинамических подшипников. Приведена информация о теплофизических свойствах криогенных жидкостей. Рассмотрено формирование математической модели в расчете характеристик однолепестковых газодинамических подшипников с гофрированными элементами. Рассмотрены вопросы аппроксимации теплофизических свойств криогенных жидкостей.

Ключевые слова: лепестковые газодинамические подшипники, маловязкие криогенные жидкости, гофрированный элемент, теплофизические свойства, математическая модель.

L.A. Savin, A.V. Sytin, V.O. Tyurin

LUBRICATION OF TULIP GAS BEARINGS BY LOW-VISCOUS CRYOGENIC LIQUIDS

The efficiency increase at minimum dimensions of movable turbo-sets is achieved at the expense of maximum admissible values of rotation frequencies (up to hundreds of thousands of rpm). At present as promising bearings with an elastic surface are tulip gas bearings. The advantages of these tulip gas bearings are the following: the capacity to self-adjustment, capacity for work under conditions of thermal deformations and at a certain gas pollution fed for lubrication. The computation of tulip gas bearings supposes a joint solution of the problems of gas dynamics, thermal physics, and theory of elasticity. The function of bending included in the equation of gap is calculated through common equations of elasticity theory for corresponding solids and in the totality with boundary conditions gives a complete description of elastic surfaces in a friction bearing. As lubrication material in gas bearings with elastic elements air is mostly used. In addition, it is possible to use low-viscous cryogenic liquids, for instance, neon. The comparison of thermal physical properties of air and low-viscous cryogenic liquid (neon) witnesses of neon application possibilities, but only at temperature of below 150°K at which its viscosity is equal approximately to the viscosity of air under normal conditions.

Key words: tulip gas bearings, low-viscous cryogenic liquids, corrugated element, thermal and physical properties, simulator.

Введение

Высокоскоростные турбомашины в процессе проектирования предполагают расчет не только проточной части, состоящей из входных и выходных патрубков, улитки и рабочих колес, но также роторно-опорного узла. При этом рост производительности при минимальных размерах нестационарных турбоагрегатов достигается за счет максимально допустимых значений частот вращения (до сотен тысяч оборотов в минуту) [1]. С минимальными потерями на трение и нагревом данным требованиям удовлетворяют только подшипники с газовой смазкой, которые, как нестандартные узлы, в каждом конкретном случае требуют всестороннего анализа, математического моделирования и проверочных расчетов по основным показателям, таким как несущая способность и потери мощности на трение. Главным условием расчета подшипников скольжения является определение полей давления в смазочном слое. Высокие частоты вращения служат источником значительных вибраций в опорах роторов, что может привести к снижению ресурса и разрушению не только роторно-опорного узла, но и рабочих колес, ремонт которых - сложный и дорогой процесс. Решением этой проблемы может быть применение подшипников с упругой поверхностью, среди которых перспективными на данный момент являются лепестковые газодинамические подшипники (ЛГДП). Разнообразие конструкций, материалов и покрытий позволяет подобрать такие подшипники в качестве опор рото-

ров высокоскоростных турбомашин в соответствии с требованиями.

Достоинства лепестковых газодинамических подшипников: способность к самоустановке, работоспособность в условиях тепловых деформаций и при некотором загрязнении газа, поступающего для смазки. Силы трения, возникающие при работе в зонах контакта между лепестками, между лепестками и корпусом, а также силы упругой деформации лепестков рассеивают энергию колебаний ротора и улучшают динамические характеристики машины, позволяют достигать высоких частот вращения. Податливость лепестка позволяет обеспечить чрезвычайно малые зазоры между цапфой и лепестком на большой площади и получить несущую способность, достаточную для многих высокооборотных турбомашин различного назначения [2].

На сегодняшний день запатентован и испытан ряд лепестковых подшипников учеными из США и других стран (пат. US № 4415280, 5634723), российскими учеными (пат. РФ № 2350794) и авторами данной статьи (пат. РФ № 2525497, 2558161, 2568005; рис. 1 [2]).

Среди разнообразия твердых смазочных покрытий, разработанных применительно к узлам трения механизмов, в лепестковых подшипниках нашли применение два вида покрытий: с органическим и неорганическим полимерным связующим. Эти покрытия наносятся методами напыления (из пульверизатора), электроосаждения, электростатического напыления. После нанесения и термообработки покрытие в некоторых случаях полируют. В массу связующего вводят наполнители двух типов: антифрикционные (графит, сульфиды, селениды и теллуриды тяжелых металлов) и износостойкие (порошки окиси хрома, стекла, окиси алюминия) [3].

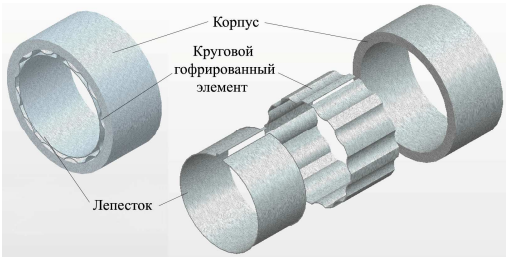


Рис. 1. Лепестковый газодинамический подшипник

Расчет лепестковых газодинамических подшипников

Расчет лепестковых газодинамических подшипников предполагает совместное решение задач газодинамики, теплофизики и теории упругости (рис. 2). В зависимости от геометрии входящих в подшипник упругих элементов, которые можно представить в виде пластин, оболочек, пологих оболочек и т.п., функция прогиба, входящая в уравнение зазора, рассчитывается по классическим уравнениям теории упругости для соответствующих тел и в совокупности с граничными условиями дает полное описание упругих поверхностей подшипника скольжения [4].

Расчетная схема лепестка представляет собой тонкую незамкнутую цилиндрическую оболочку, защемленную по одной образующей и свободную по другой, нагруженную внутренним давлением (рис. 3). Торцы оболочки свободны, нагрузка не симметрична относительно оси цилиндра, следовательно, деформация сводится к прогибу. Величину прогиба в подобных случаях можно получить с достаточной точностью, совершенно пренебрегая растяжением срединной поверхности оболочки.

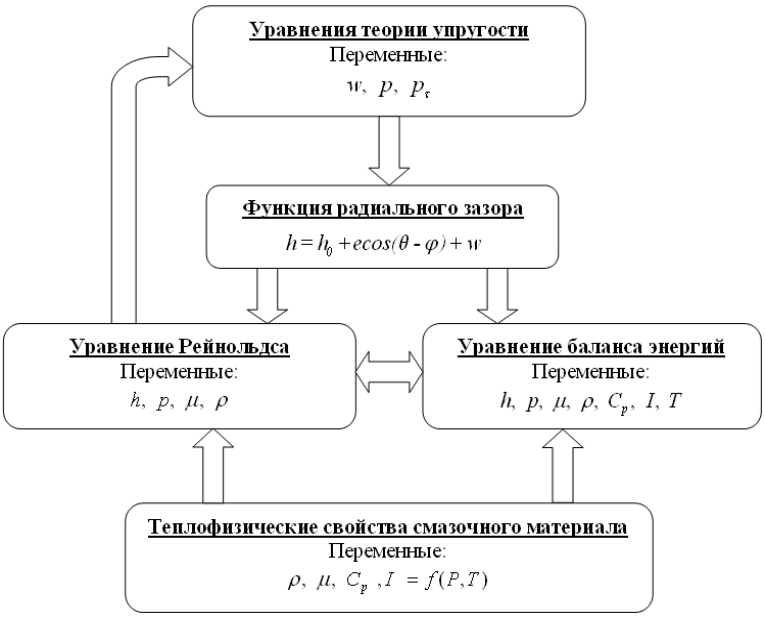


Рис. 2. Схема решения комплексной задачи: w – прогиб упругого элемента, м; p_τ - касательные напряжения, Па; h_0 – начальный зазор, м; e – эксцентриситет, м; θ – угловая координата, рад; φ - расчетный угол, рад; для смазочного материала: p – давление, ат; T – температура, К; ρ – плотность, кг/м^3; C_p – теплоемкость, Дж/(кг·К); I – энтальпия, Дж/кг; μ – вязкость, Па·с

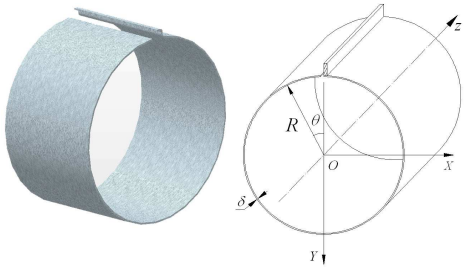


Рис. 3. Расчетная схема лепестка

Для описания напряженно-деформированного состояния оболочечного элемента используем моментную теорию расчета цилиндрических оболочек [5], что позволяет рассмотреть неосесимметричное нагружение.

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \dfrac{1-\nu}{2R^2}\dfrac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \dfrac{1+\nu}{2R}\dfrac{\partial^2 \vartheta}{\partial z \partial \theta} + \dfrac{\nu}{R}\dfrac{\partial w}{\partial z} = 0; \\ \dfrac{1+\nu}{2R}\dfrac{\partial^2 u}{\partial z \partial \theta} + \dfrac{1}{R^2}\dfrac{\partial^2 \vartheta}{\partial \theta^2} + \dfrac{1-\nu}{2}\dfrac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} + \dfrac{1}{R^2}\dfrac{\partial w}{\partial \theta} = -\dfrac{1-\nu^2}{E\delta} p_\tau(\theta, z); \\ \dfrac{\nu}{R}\dfrac{\partial u}{\partial z} + \dfrac{1}{R^2}\dfrac{\partial \vartheta}{\partial \theta} + \dfrac{w}{R^2} + \\ + \dfrac{k_1}{R}\left[R^3 \dfrac{\partial^4 w}{\partial z^4} + 2R\dfrac{\partial^4 w}{\partial z^2 \partial \theta^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial^4 w}{\partial \theta^4}\right] = -\dfrac{1-\nu^2}{E\delta} p(\theta, z), \end{cases}$$

где $p(\theta,z)$ – нормальное контактное усилие (давление); $p_\tau(\theta,z)$ – касательное контактное усилие; z – осевая координата, м; ϑ – перемещение в окружном направлении, м; u – перемещение в осевом направлении, м; δ – толщина оболочки, м; ν – коэффициент Пуассона; R – внутренний радиус подшипника, м; E – модуль упругости, Па; $k_1 = \delta^2 / 12R^2$.

Рассмотрение кругового гофрированного элемента (рис. 4) целесообразно начать с отдельного гофра. Каждый гофр рассматривается в виде незамкнутой цилиндрической оболочки со свободными торцами и свободным

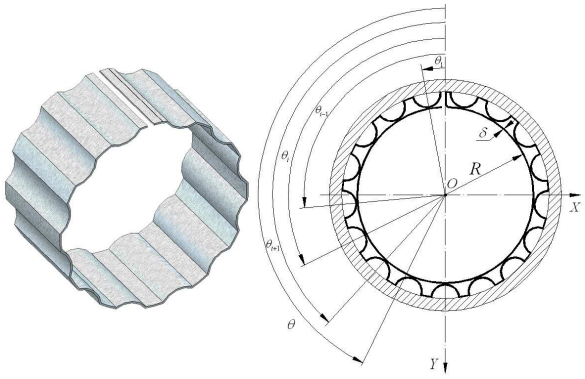


Рис. 4. Расчетная схема кругового гофрированного элемента

опиранием образующих на корпус подшипника.

Деформация упругих элементов находится с учетом совместного прогиба лепестка и гофра под действием приложенной к ним нагрузки (рис. 5).

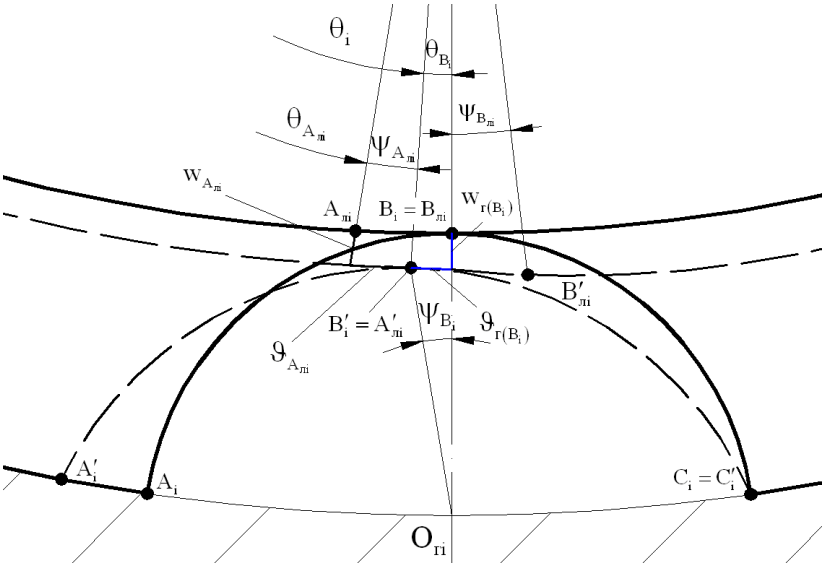


Рис. 5. Схема совместного прогиба лепестка и гофра

В данной работе считается, что лепесток и гофр, в недеформированном состоянии представляющие две цилиндрические оболочки, контактируют по общей образующей. Главными условиями совместного прогиба являются условия контакта лепестка и гофра после деформации и взаимного непроникновения контактирующих поверхностей [2].

В общем виде процесс совместной деформации лепестка и кругового гофрированного элемента под действием газодинамического давления представлен на рис. 6.

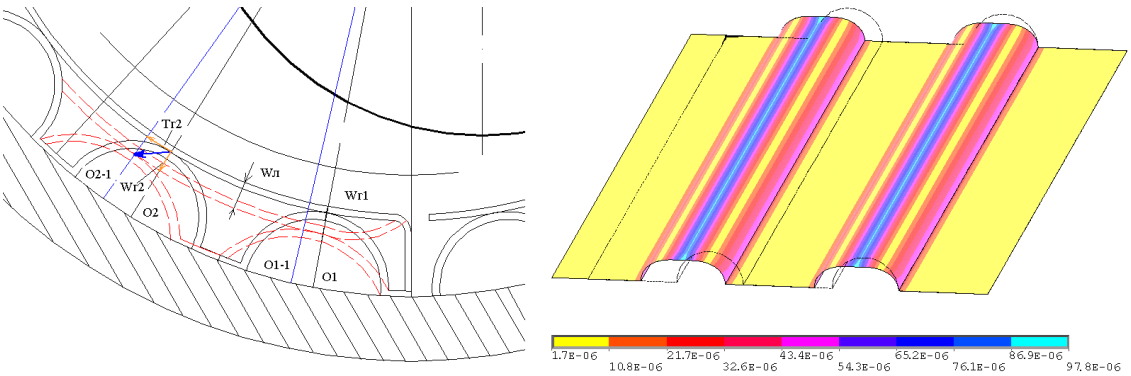


Рис. 6. Совместная деформация лепестка и кругового гофрированного элемента

Расчет системы сводится к последовательному расчету элементов с последующим перерасчетом с учетом их взаимного влияния. Этим достигается максимальное приближение к реальным процессам, происходящим во время работы данной конструкции.

Применение маловязких криогенных жидкостей в качестве смазочного материала

Критериями выбора смазочных материалов для подшипников жидкостного трения могут быть различные факторы в зависимости от назначения машин и агрегатов. Так, для смазки опорных узлов агрегатов двигательных установок летательных аппаратов, например турбонасосных агрегатов ЖРД, используется перекачивание компонентов топлива. Смазка и охлаждение аэростатодинамических подшипников высокоскоростных электрошпинделей и турбокомпрессоров осуществляется воздухом, подающимся под давлением или из окружающей среды. В качестве смазочного материала в лепестковых газодинамических подшипниках наиболее часто используется воздух [6; 7].

В последние годы находят широкое применение нетрадиционные смазочные материалы. В первую очередь это низкотемпературные и криогенные жидкости (жидкий кислород, водород, неон, аммиак и т. д.), сфера применения которых связана с использованием в энергетических силовых и вспомогательных установках транспортных и технологических систем. При смазке и охлаждении подшипников этими маловязкими жидкостями возникают специфические явления в несущих слоях, обусловленные повышенной турбулентностью, критическими течениями и фазовыми превращениями [4].

Применение криогенных рабочих тел в транспортных системах связано с решением двух глобальных проблем: разработкой надежных экономичных двигателей длительного ресурса и созданием промышленных установок для получения дешевых низкотемпературных жидкостей. Одним из важных компонентов их реализации является использование высокоскоростных агрегатов с турбинным приводом (насосы, компрессоры, детандеры), работающих на лепестковых подшипниках при смазке маловязкими криогенными жидкостями, например неоном. Для большинства параметров один из факторов - давление или температура - является определяющим, поэтому большинство параметров зависят от одного главного фактора при определенном значении другого. Результаты аппроксимации свойств неона в диапазоне T = 28…280 К, P = 0,1…20 МПа и свойств воздуха в диапазоне T = 270…380 К, P = 0,1…30 МПа представлены в виде аналитических зависимостей $f=f(P,T)$ и приведены в таблице [8; 9].

Таблица

Результаты аппроксимации

Параметр	Аналитическая зависимость
Неон	
Вязкость μ, x10^{-6} Па·с	$6,638+17,172T+10,576P-0,035T^2-0,108P^2-0,061TP+$ $+4,68\cdot10^{-5}T^3-0,014P^3+0,0029TP^2-2,6\cdot10^{-5}T^2P$
Плотность ρ, x10^3 кг/м^3	$\frac{20,833-0,328T+0,0018T^2-3,3210^{-6}T^3+4,976\ln(P)+1,144(\ln(P))^2}{1+0,008T-7,12\cdot10^{-6}T^2-4,5\cdot10^{-9}T^3-0,381\ln(P)-1,64\cdot10^{-5}(\ln(P))^2}$
Энтальпия I, x10^5 Дж/кг	$-1044,48+870,65\ln(T)-14,319P-224,67(\ln(T))^2-0,002P^2+5,626P\ln(T)+$ $+20,42(\ln(T))^3-7,58\cdot10^{-5}P^3+0,8\cdot10^{-3}P^2\ln(T)-0,552P(\ln(T))^2$
Теплоемкость C_P, x10^3 Дж/(кг·К)	$2,54-0,646\ln(T)+0,044P+0,068(\ln(T))^2-7,76\cdot10^{-5}P^2-0,008P\ln(T)$
Воздух	
Вязкость μ, x10^{-6} Па·с	$\frac{10,85+0,221P-0,0358P^2+0,37\cdot10^{-3}P^3-0,02321T-0,24\cdot10^{-3}T^2}{1+0,0184P-0,00156P^2+2,2937\cdot10^{-5}P^3-0,0065T}$
Плотность ρ, x10^3 кг/м^3	$\frac{0,00718-0,0164P-2,251\cdot10^{-5}T}{1+0,00191P-0,264\cdot10^{-3}P^2-0,00977T+6,128\cdot10^{-6}T^2}$
Энтальпия I, x10^5 Дж/кг	$14,282+0,0276P-\frac{6267,21}{T}-0,482\cdot10^{-3}P^2+\frac{1335192,7}{T^2}-$ $-\frac{12,9P}{T}+3,531\cdot10^{-6}P^3-\frac{1,06\cdot10^8}{T^3}-\frac{615,06P}{T^2}+\frac{0,196P^2}{T}$
Теплоемкость C_P, x10^3 Дж/(кг·К)	$\frac{1,113-7,1\cdot10^{-3}P+0,374\cdot10^{-3}P^2+4,079\cdot10^{-6}P^3-7,44\cdot10^{-3}T+1,705\cdot10^{-5}T^2}{1+0,0138P+0,528\cdot10^{-3}P^2-6,69\cdot10^{-3}T+1,58\cdot10^{-5}T^2}$

Графические результаты аппроксимации представлены на рис. 7.

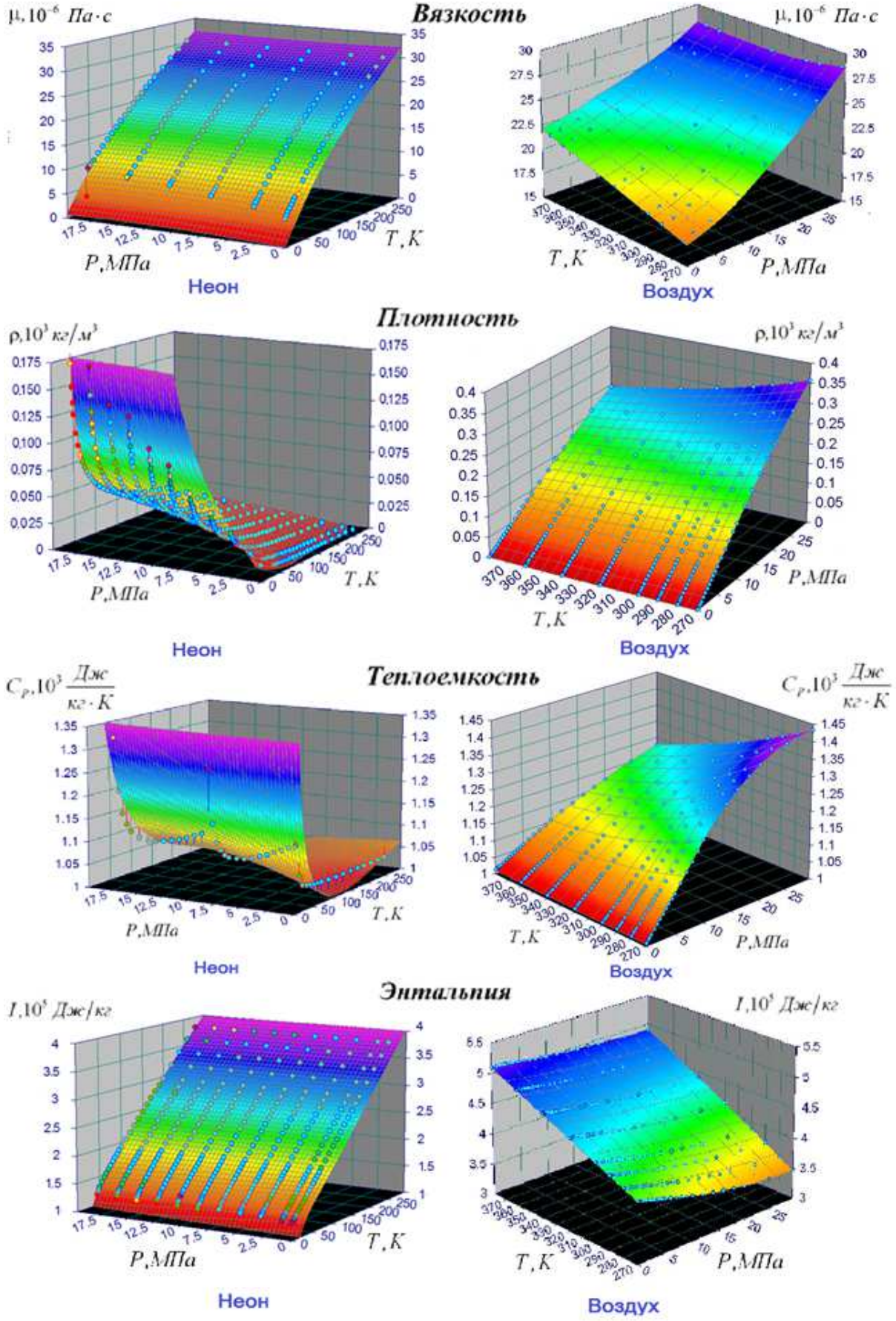


Рис. 7. Графические результаты аппроксимации теплофизических свойств воздуха и неона

Заключение

Сравнение теплофизических свойств воздуха и маловязкой криогенной жидкости (неона) свидетельствует о возможности применения неона, но только при температуре ниже 150 градусов Кельвина, при которой его вязкость приблизительно равна вязкости воздуха при нормальных условиях.

Полученные аппроксимационные зависимости неона позволяют рассчитывать лепестковые подшипники в неизотермической постановке. Аппроксимационные зависимости с данной степенью точности (погрешности расчета не превышают 1%) при подстановке в уравнение Рейнольдса для определения полей давления и уравнение баланса энергии позволяют рассчитывать подшипники скольжения в неизотермической постановке, что дает более точное описание процессов в смазочном слое, приближая математическую модель к реальному объекту.

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта № 9.101.2014/К проектной части государственного задания в сфере научной деятельности «Гидродинамические эффекты в напорно-сдвиговых течениях сред сложной реологии в каналах переменной геометрии» (2014 – 2016 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаевик, Д.Т. Подшипниковые опоры современных машин / Д.Т. Гаевик. – М.: Машиностроение, 1985. – 248 с.
2. Сытин, А.В. Решение комплексной задачи расчета характеристик радиальных лепестковых газодинамических подшипников: дис….канд. техн. наук / А.В. Сытин. – Орел, 2008. – 200 с.
3. Леонов, В.П. Лепестковые газовые подшипники турбомашин / В.П. Леонов, Т.И. Максимович. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 60 с.
4. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения: монография / Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 444 с.
5. Хешмет, Х. Анализ газового ленточного радиального подшипника / Х. Хешмет, Дж. А. Уоловит, О. Пинкус // Проблемы трения и смазки. – 1983. –Т.105. –№4. – С. 124-132.
6. Пешти, Ю.В. Газовая смазка / Ю.В. Пешти. – М.: МГТУ, 1993. – 381с.
7. Самсонов, А.И. Подшипники с газовой смазкой для турбомашин / А.И. Самсонов. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 1996. – 112 с.
8. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М., 1972. – 720 с.
9. Рабинович, В.А. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона / В.А.Рабинович, А.А. Вассерман, В.И. Недоступ, Л.С. Векслер. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 636 с.

1. Gaevik, D.T. Bearing Support of Modern Machinery / D.T. Gaevik. – M.: Mechanical Engineering, 1985. – pp. 248.
2. Sytin, A.. Solution of complex problem in computation of journal tulip gas bearing properties: Thesis for Can.Eng.Degree / A.V. Sytin. – Orel, 2008. – pp. 200.
3. Leonov, V.P. Tulip Gas Bearings for Turbomachines / V.P. Leonov, T.I. Maximovich. –M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2002. – pp. 60.
4. Savin, L.A. Modeling of Rotor Systems with Bearings of Liquid Friction: Monograph / L.A. Savin, O.V. Solomin. – M.: Mechanical Engineering-1, 2006. – pp. 444.
5. Heshmet, H. Analysis of gas foil journal bearing / H. Heshmet, J. A. Wollowit, O. Pinkus // Problems of Friction and Lubrication. –1983. –T.105. –№4. – pp. 124-132.
6. Peshty, Yu.V. Gas Lubrication / Yu.V. Peshty. – M.: MSTU, 1993. – pp. 381.
7. Samsonov, A.I. Bearings with Gas Lubrication for Turbomachines / A.I. Samsonov. – Vladivostok: Publishing House of FESTU, 1996. – pp. 112.
8. Vargaftik, N.B. Reference Book on Thermal and Physical Properties of Gas and Liquids / N.B. Vargaftik. – M., 1972. – pp. 720.
9. Rabinovich, V.A. Thermal and Physical Properties of Neon, Argon, Krypton and Xenon / V.A. Rabinovich, A.A. Wasserman, V.I. Nedostup, L.S. Weksler. – M., Publishing House of Standards, 1976. – pp. 636.

Статья поступила в редколлегию 5.04.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного университета
Киричек А.В.

Сведения об авторах:

Савин Леонид Алексеевич, зав. кафедрой «Мехатроника и международный инжиниринг» Приокского государственного университета, e-mail: savin@ostu.ru.
Сытин Антон Валерьевич, доцент кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг» Приокского государственного университета, e-mail: sytin@mail.ru.
Тюрин Валентин Олегович, аспирант Приокского государственного университета, e-mail: v7a7l@mail.ru.

Savin Leonid Alexeyevich, Head of the Dep. "Mechatronics and International Engineering" Prioksky State University, e-mail: savin@ostu.ru.
Sytin Anton Valerievich, Assistant Prof. of the Dep. "Mechatronics and International Engineering" Prioksky State University, e-mail: sytin@mail.ru.
Tyurin Valentin Olegovich, Post graduate student Prioksky State University, e-mail: v7a7l@mail.ru.

УДК 620.178.162.4; 620.194.3
DOI: 10.12737/20239

Е.А.Памфилов, Я.С.Прозоров, С.В.Кузнецов, С.В.Лукашов

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Дана краткая характеристика коррозионно-механического вида изнашивания. Рассмотрены схемы для его исследования в условиях трения скольжения. Выделены основные группы методов исследования коррозионно-механического изнашивания: гальванические, потенциодинамические, потенциостатические и электрохимическая импендансная спектроскопия. Приведено описание каждой группы методов и сделан их краткий сравнительный анализ.

Ключевые слова: коррозионно-механическое изнашивание, трение скольжения, трибокоррозия, трибоэлектрохимическая ячейка, электрохимическая импендансная спектроскопия.

E.A. Pamfilov, Ya.S. Prozorov, S.V. Kuznetsov, S.V. Lukashov

INVESTIGATION PECULIARITIES OF MECHANOCHEMICAL WEAR UNDER CONDITIONS OF SLIDING FRICTION

Mechanochemical wear (tribocorrosion) is metal destruction caused by a simultaneous action of friction and corrosion. In many cases the interference of mechanical and chemical phenomena (synergism) is manifested as a result of which the situation of wear can change considerably. Tribocorrosion occurs in a wide spectrum of combined mechanical and chemical effect.
The regularities of the interference manifestation of mechanical and chemical factors in tribocorrosion have been studied insufficiently neither theoretically, nor experimentally. For the analysis of tribocorrosion properties of materials under conditions of sliding friction there is offered the use of the system allowing the exposition of a sample simultaneously to tribological and corrosion processes.
There are emphasized and described merits and demerits of the basic groups of methods for the investigation of mechanochemical wear: galvanic, potentio-dynamic and electro-chemical impedance spectroscopy.

It is defined that at the investigation of tribocorrosion it should be purposeful to use electro-chemical methods inasmuch as they allow modeling many chemical properties of corrosion environment at the simultaneous mechanical effect.

Key words: mechanochemical wear, sliding friction, tribocorrosion, triboelectrochemical cell, electrochemical impedance spectroscopy.

Коррозионно-механическое изнашивание (трибокоррозия) представляет собой разрушение материала в результате одновременного действия трения и коррозии. При этом во многих случаях проявляется взаимовлияние механических и химических явлений (синергизм), в результате чего картина изнашивания может существенно изменяться. Трибокоррозия происходит в широком спектре совместных механических и химических воздействий. Механическое изнашивание при этом возникает в результате фрикционного контакта твердых тел (трение скольжения и качения, фреттинг), воздействий потока жидкости (кавитация) и абразивных частиц (эрозия). Коррозия возникает вследствие присутствия в зоне контакта химически агрессивных жидких сред или окисляющих газов. Эксплуатация в подобных условиях характерна для металлургического оборудования, техники химической, деревообрабатывающей, строительной и нефтяной отраслей промышленности.

К сожалению, закономерности проявления взаимовлияния механического и химического факторов трибокоррозии пока недостаточно изучены как теоретически, так и экспериментально. Это связано с тем, что для изучения коррозионно-механического изнашивания необходимо одновременное воспроизведение механических и химических составляющих процессов изнашивания. В последнее время в зарубежной и отчасти отечественной практике исследования коррозионно-

механического изнашивания используются методы, применяемые при изучении коррозии. С их помощью можно понять, как механическое изнашивание влияет на кинетику реакций коррозии, а также оценить влияние этих реакций на механические характеристики фрикционного контакта [1].

Поэтому необходима разработка методики использования экспериментов для исследования коррозионно-механического изнашивания и их стандартизация. В результате выполнения указанных работ в 2004 году был создан стандарт США ASTM G119 [2], описывающий порядок вычленения компонентов коррозионно-механического-изнашивания и исследования взаимодействия между ними. Европейские исследователи предложили собственный экспериментальный подход к исследованию трибокоррозии [3-5]. Оба этих подхода основаны на объединении электрохимических и трибологических нагрузок и могут быть выполнены с помощью одного и того же экспериментального оборудования. Однако G119 включает изнашивание при анодной и катодной поляризации для исследования взаимодействия между износом и коррозией, а европейский подход предусматривает изнашивание в условиях равновесного потенциала E_{oc}.

Для изучения трибокоррозионных характеристик материалов в условиях трения скольжения предлагается использовать систему, позволяющую подвергать исследуемый образец одновременно трибологическим и коррозионным процессам [6]. При этом возможно применение стандартизованных как в России, так и за рубежом схем «палец - диск» и «сфера - плоскость». В настоящее время для проведения таких исследований применяется большое количество установок, в том числе и серийного изготовления.

При создании стендов для исследования коррозионно-механического изнашивания должны быть обеспечены следующие основные требования:

1. Зона фрикционного контакта должна быть полностью погружена в раствор электролита. При этом в целях безопасности образец желательно выполнять неподвижным со скользящим поверх него контробразцом.

2. Образец должен быть электрически подключен к потенциостату и выполнять функции рабочего электрода. Таким образом, он является элементом трибоэлектрохимической ячейки, включающей в себя также вспомогательный и противоэлектрод, которые позволяют контролировать электрохимические параметры воздействия на образец при проведении экспериментов. Схема трибоэлектрохимической ячейки представлена на рис. 1.

3. Для изготовления контробразца желательно использовать диэлектрические материалы (например оксид алюминия или диоксид циркония), что позволяет предотвратить гальваническую связь между образцом и контробразцом. Если это невозможно, тогда он должен быть изолирован от остальной части устройства.

4. Держатель контробразца также должен быть изготовлен из непроводящего ток материала, чтобы предотвратить электрический контакт между электролитом и аппаратурой.

Для оценки устойчивости материалов к коррозии возможно использование различных электрохимических методов, а именно гальванических, потенциодинамических, потенциостатических и электрохимической импедансной спектроскопии. Эти методы могут активно использоваться в трибокоррозионных экспериментах для оценки взаимосвязи между механическим и химическим компонентами износа.

При выполнении исследований трибокоррозии наибольшее распространение получили подходы, объединяющие в себе электрохимические и трибологические испытания: 1) исследование процессов в зоне трения скольжения при накладываемом внешнем потенциале электрохимической ячейки [2]; 2) изучение трения в условиях равновесного потенциала системы [3; 5].

Метод наложения внешнего потенциала предполагает проведение исследований в 4 этапа. Параметры проведения экспериментальных исследований определяются на основе анализа условий эксплуатации: параметры трения, нормальная нагрузка *P*, путь трения *L*, скорость сколь-

жения V, свойства контробразца, вид электролита, его температура, кислотность, накладываемый анодный потенциал. Площадь поверхности образца, подверженной воздействию электролита, обозначается A_o и обычно имеет определенное значение. Эта площадь включает две зоны: область изнашивания в пределах дорожки трения A_w и неизношенную поверхность $A_o - A_w$.

Эксперимент проводится в следующем порядке: вначале осуществляется очистка и промывка образца, после чего он погружается в раствор электролита. После погружения образца необходимо дождаться стабилизации значения равновесного потенциала ячейки E_{oc}.

Общая потеря массы материала M_{tot} в условиях коррозионно-механического изнашивания может быть выражена как $M_{tot} = M_{mech+} M_{c+} M_{syn}$, где M_{mech} - потеря массы за счет механического износа в отсутствие коррозии; M_c - потеря массы из-за коррозии в отсутствие изнашивания; M_{syn} - потеря массы за счет взаимодействия между износом и коррозией. M_{syn} можно представить в виде суммы двух слагаемых: $M_{w\text{-}c}$ и $M_{c\text{-}w}$, где $M_{w\text{-}c}$ - увеличение коррозионных потерь из-за механических воздействия (индуцированная трением корррозия), $M_{c\text{-}w}$ - увеличение механического износа вследствие коррозии (индуцированный коррозией износ). Поэтому предыдущее уравнение может быть выражено следующим образом:

$$M_{tot} = M_{mech} + M_c + M_{c-w} + M_{w-c}. \quad (1)$$

Потеря массы образца в результате электрохимических реакций может быть определена по закону Фарадея:

$$M = \frac{i_a M_a t}{nF},$$

где M (кг) – потеря массы металла в результате химических реакций за время t (с); i_a (А) - сила анодного тока; M_a (кг/моль) - атомная масса; n — число валентных электронов; F - постоянная Фарадея.

Для чистых металлов показатель n обычно известен. Для сплавов n получают с учетом их составных элементов (при условии что все они участвуют в процессе окисления) по формуле

$$n = \sum X_j n_j,$$

где X_j и n_j - часть и число электронов валентности элемента j соответственно.

На ***первом этапе*** определяется суммарный износ M_{tot}, измеряемый как потеря массы образцов до и после единичных испытаний в условиях коррозионно-механического изнашивания.

Второй этап экспериментов (анодная поляризация) проводится в тех же условиях, что и первый, но между металлическим образцом (рабочим электродом) и электродом сравнения дополнительно задается фиксированный потенциал, поддерживающийся за счет тока между рабочим электродом и противоэлектродом (рис. 1).

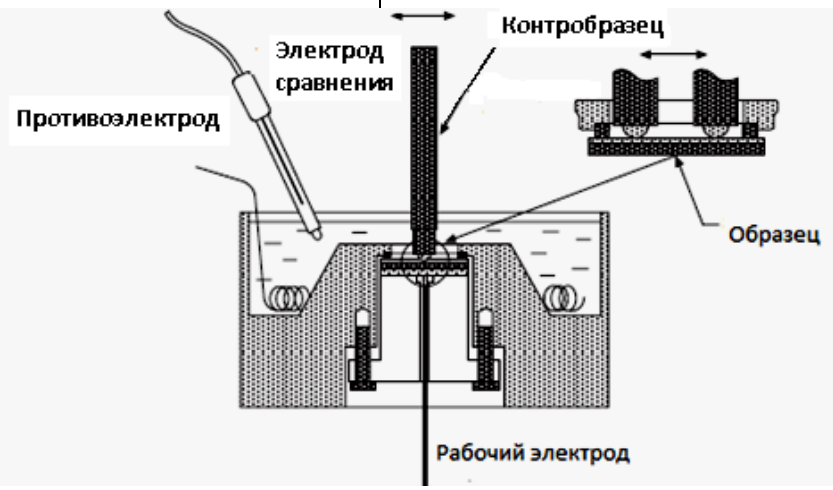


Рис. 1. Трибоэлектрохимическая ячейка для исследования двунаправленного трения скольжения

Когда ток достигает стабильного значения i_a, в добавление к коррозионной нагрузке образец вступает во фрикционный контакт с контробразцом. Измеряемый анодный ток в условиях трения обозначается i_w (рис. 2). Сила тока измеряется при фиксированном потенциале в зависимости от времени. Таким образом, возможно проследить изменения электрохимической кинетики реакций окисления и восстановления, происходящих в зоне фрикционного контакта образца и контробразца. Потери материала из-за коррозии M_c и индуцированной трением коррозии M_{w-c} определяются следующим образом:

$$M_c = \frac{i_a M_a t}{nF};$$

$$M_{w-c} = \frac{(i_w - i_a) M_a t}{nF}.$$

Следует отметить, что M_c рассматривается только для области локализации износа A_w для сравнения его значения с M_{w-c}. Площадь износа A_w определяется после трибокоррозионного испытания. Для пассивных материалов M_c пренебрежимо мало по сравнению с M_{w-c} , поскольку разрушение защитных пассивирующих пленок ведет к значительному ускорению растворения металла.

На данном этапе испытаний определяются значения стационарного потенциала E_{cor}, поляризационного сопротивления R_p и постоянных Тафеля β_a и β_c, а также вычисляются величины i_w и M_{w-c}.

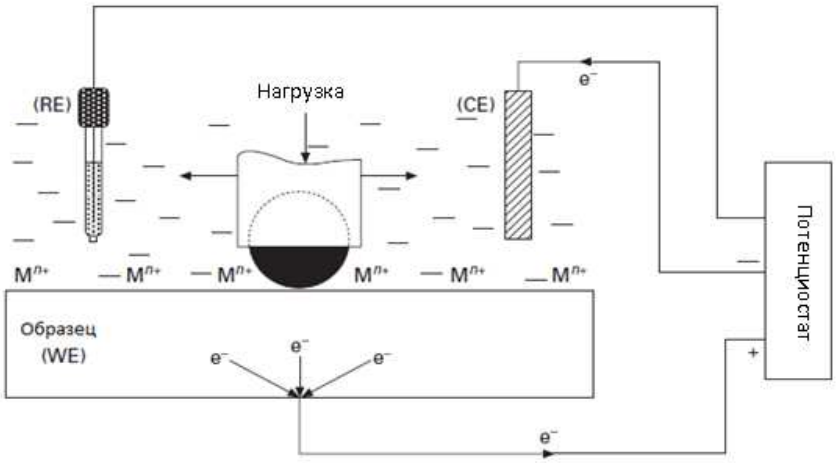


Рис. 2. Механизм коррозионно-механического изнашивания при наложенном внешнем потенциале

На ***третьем этапе*** испытаний определяют механический компонент износа M_{mech}, для чего добиваются минимизации химического воздействия на образец. Стандарт ASTM G119 для этого предлагает применять катодную защиту (рис. 3) в размере -1В от равновесного потенциала ячейки E_{oc}. Европейские исследователи рекомендуют использовать нейтральную среду с pH=7. В некоторых исследованиях используются сразу два подхода [2;3].

Четвертый этап представляет собой вариацию классического измерения коррозионной стойкости материала образца при отсутствии фрикционного контакта, при котором образец из исследуемого материала помещается в электролит на заданное время. По результатам испытаний определяется M_c.

После определения M_{tot}, M_{w-c}, M_{mech} и M_c значение M_{c-w} вычисляется из приведенного уравнения (1). Отметим, что значение M_{c-w} может быть положительным в случаях, когда химические реакции способствуют смазыванию или уменьшают механический износ.

Основным преимуществом данной методики является возможность количественной оценки компонентов износа после серии экспериментальных тестов. Однако необходимость задания катодной защиты на одном из этапов эксперимента может

привести к наводороживанию образцов. С другой стороны, наличие как катодной защиты, так и нейтральной среды не всегда приводит к полной остановке коррозии и химических реакций в зоне фрикционного контакта, что свидетельствует об отсутствии универсальности у данного подхода.

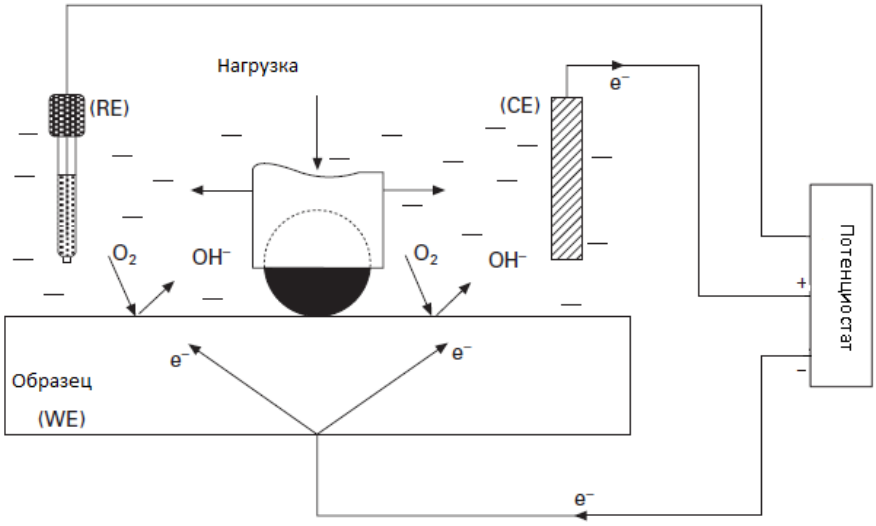


Рис. 3. Механизм коррозионно-механического изнашивания в условиях катодной защиты

Методика исследования коррозионно-механического изнашивания в условиях равновесного потенциала системы заключается в исследовании трения скольжения образца, погруженного в заданный электролит, без наложения внешнего потенциала. В указанной методике выделяют три подгруппы методов: мониторинг значения равновесного потенциала E_{oc}, исследование вольт-амперных характеристик и электрохимическая импедансная спектроскопия.

Мониторинг значения равновесного потенциала E_{oc} - простой в реализации метод, главным недостатком которого является невозможность дать количественную оценку механического и химического компонентов трибокоррозии. Равновесный потенциал системы E_{oc} – потенциал, установившийся между рабочим электродом и электродом сравнения, при котором в электрохимической системе «образец – электролит» имеют место анодные и катодные реакции. Этот параметр позволяет определить химическую активность материала образца в заданном электролите. Низкое значение E_{oc} показывает, что материал подвержен активному растворению, тогда как высокое значение E_{oc} свидетельствует о пассивности материала. Сущность метода заключается в фиксации изменений значения потенциала E_{oc} до, в течение и после приложения к образцу фрикционной нагрузки. Перед началом испытаний следует дождаться стабилизации значения потенциала. Во время трения образца его поверхность становится неоднородной, между изношенной областью A_w (внутри дорожки трения) и неизношенной областью $A_o - A_w$ (вне дорожки трения) возникают гальванические связи, что приводит к изменению значения потенциала электрода (рис. 4). После окончания процесса трения в результате стабилизации формируется новое значение электродного потенциала E_{oc}, характер изменения которого определяет способность материала восстанавливаться после трибологической нагрузки.

Для пассивных металлов, таких как нержавеющая сталь и титановые сплавы, резкое снижение потенциала E_{oc} обычно наблюдается в начале трения и объясняется воздействием ювенильной поверхности металла на электролит из-за разрушения оксидного пассивирующего слоя на поверхности дорожки трения. Металл в этой

зоне окисляется, образуя растворимые ионы и/или твердые продукты:

$$M \rightarrow M^{n+} + ne;$$

$$M + n/2\ H_2O \rightarrow MO_{n/2} + nH^+ + ne^-.$$

Образовавшиеся электроны должны быть вовлечены в катодную реакцию для продолжения окислительных реакций:

- в условиях наличия кислорода:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- ;$$

- в условиях отсутствия кислорода, pH < 7:

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 ;$$

- в условиях отсутствия кислорода, pH ≥ 7:

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-.$$

Значение потенциала E_{oc} во время трения зависит от коррозионных потенциалов изношенной и неизношенной областей образца, кинетики химических реакций в зоне трения, а также от отношения r площадей анодной (изношенной) и катодной областей образца. Если изношенной становится вся функциональная поверхность образца, то r стремится к единице и значение потенциала E_{oc} приближается к значению потенциала металла в контакте с его ионом $E_{M/M+}$. При отсутствии износа поверхности (r = 0) потенциал E_{oc} практически не меняется. Таким образом, значения потенциала E_{oc} пассивных материалов при трибокоррозии варьируются в диапазоне от максимального (до приложения фрикционной нагрузки) до минимального ($E_{oc} = E_{M/M+}$).

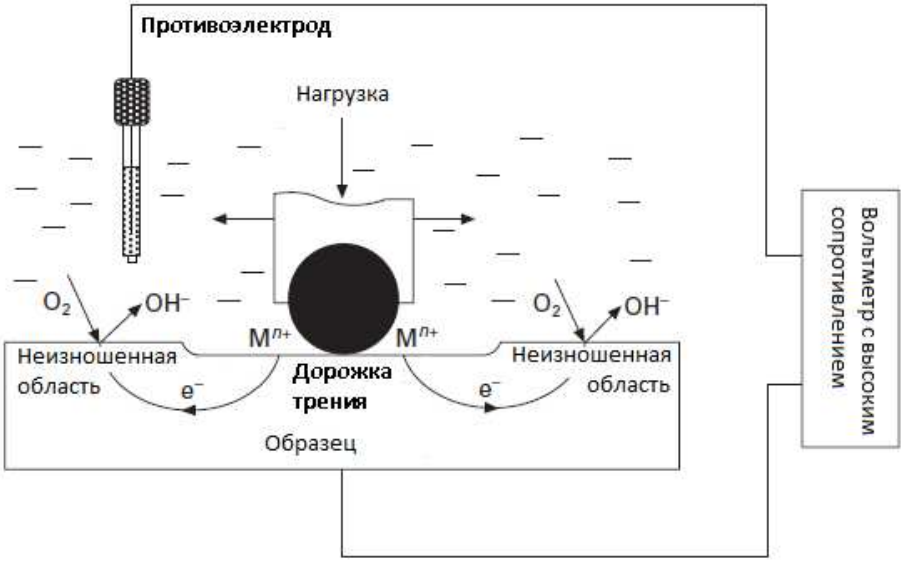


Рис. 4. Возникновение гальванических связей при испытаниях в условиях равновесного потенциала системы

Для количественной оценки трибокоррозионного износа предлагается схема измерения вольт-амперных характеристик между двумя электродами из одинакового материала. Первый электрод используется как образец, а второй служит противоэлектродом (рис. 4). Два электрода связаны через амперметр, измеряющий гальванический ток. Перед приложением фрикционной нагрузки к образцу гальванический ток равен нулю, так как электроды имеют одинаковое значение потенциала E_{oc}. В условиях трения потенциал образца сдвигается, между образцом и контрэлектродом создается гальваническая ячейка. Возникающий гальванический ток измеряется амперметром. Этот метод применяется в тех случаях, когда изношенная область поверхности образца генерирует электроны в процессе окисления металла, а катодная реакция на неизношенной области задействует эти электроны. Изменение значения протекающего тока объективно характеризует влияние трения на процесс коррозии.

Стоит отметить, что не все электроны, порожденные реакцией окисления металла, проходят через амперметр. Поэтому данный метод показывает скорее тенденцию, но не дает репрезентативного количественного результата. Для определения точной количественной оценки либо изолируют поверхность образца от электроли-

та (за исключением изношенной области) с целью снизить катодные реакции на поверхности образца, либо увеличивают размер вспомогательного электрода. Преимуществами этого метода являются его простота и доступность, недостатками – квазиобъективная количественная оценка влияния трения на процесс коррозии и отсутствие возможности определить влияние коррозии на изнашивание.

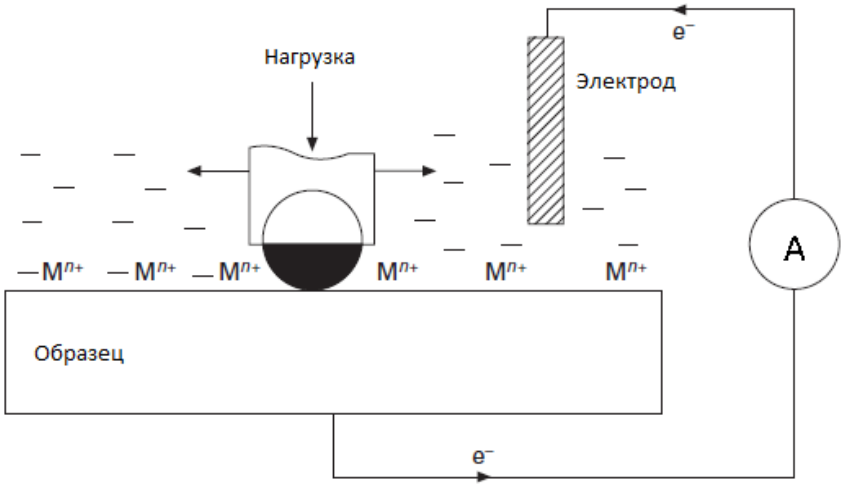


Рис. 5. Схема измерения вольт-амперных характеристик гальванической связи между электродом и контрэлектродом

Сущность **метода электрохимической импедансной спектроскопии (EIS)** состоит в получении отклика в виде изменения силы тока при воздействии потенциальных колебаний (обычно с медианным значением E_{oc}) с амплитудой E_a и частотой f на электрохимическую систему. Электрохимический импеданс Z, являющийся отношением потенциала к току, вычислен по выбранному частотному диапазону для получения спектра импеданса. Последний моделируется с использованием эквивалентного электродного потенциала исследуемой системы.

Необходимым условием для генерации спектра сопротивления является стабильность электрохимической системы с точки зрения электродного потенциала. В целом колебания потенциала E_{oc} должны быть менее 1 мВ/мин, что в условиях коррозионно-механического изнашивания труднодостижимо. На текущий момент метод успешно применяется только для пассивных материалов, подвергающихся однонаправленной нагрузке трением скольжения.

Согласно применяемой методике, делается предположение, что дорожка трения на образце состоит из двух отдельных зон: активной площадки A_{act}, где исходный пассивирующий слой был удален; и пассивной площади A_{repass}, где оксидный слой либо не был удален, либо уже восстановился. Площадь поверхности дорожки износа A_{tr} рассматривается как площадь поверхности, измеренной в конце испытания в условиях трения скольжения:

$$A_{tr} = A_{act} + A_{repass}.$$

Потеря массы материала в дорожке трения W_{tr} состоит из компонентов, связанных с различными зонами износа на дорожке износа:

$$W_{tr} = W^c_{act} + W^m_{act} + W^c_{repass} + W^m_{repass},$$

где W_{tr} – суммарная потеря массы материала в дорожке износа; W^c_{act} – потеря массы материала в результате коррозии материала в активной площади; W^m_{act} – потеря массы материала в результате механического изнашивания материала в активной площади; W^c_{repass} – потеря массы материала в результате коррозии материала в пассивной площади; W^m_{repass} – потеря массы материала в результате механического изнашивания материала в пассивной площади.

Величина W^c_{repass} находится путем измерения EIS до износа (после стабилизации потенциала E_{oc}). Поляризационное сопротивление пассивного материала определяется по формуле

$$R_{repass} = R_0\ A_0,$$

где R_0 – поляризационное сопротивление пассивной области образца, измеренное при помощи EIS; A_0 – площадь поверхности образца.

Плотность тока через пассивную область может быть выражена следующим образом:

$$i_{repass} = \frac{B}{r_{repass}}, \qquad (2)$$

где B - константа, обычно в диапазоне между 13 и 35 мВ для металлических материалов (для проведения экспериментов рекомендуется использовать значение 24 мВ).

Потеря массы материала в результате коррозии пассивной области на дорожке износа определяется законом Фарадея:

$$W^c_{repass} = i_{repass}\ A_{repass} \frac{M}{nFd}\ t. \qquad (3)$$

В условиях постоянного трения скольжения предполагается, что на дорожке трения активная площадь преобладает (времени для репассивации поверхности металла недостаточно). Можно считать, что $A_{tr} = A_{act}$ (A_{repass} пренебрежимо мало) и $W_{tr} = W^m_{cat} + W^m_{act}$. Электрохимическая импедансная спектроскопия выполняется в процессе приложения фрикционной нагрузки к образцу. Таким образом, по аналогии с формулой (3) можно найти W^m_{act} для активной площади:

$$W^c_{act} = i_{act}\ A_{act} \frac{M}{nFd} t. \qquad (4)$$

Потеря массы материала в результате механического износа активного материала вычисляется по формуле

$$W^m_{act} = W_{tr} - W^c_{act}\ . \qquad (5)$$

Для формирования репассивирующего слоя на изношенной поверхности образца после приложения фрикционной нагрузки делают перерыв, достаточный для образования этого слоя. Считается, что доля поверхности, покрытой репассивирующим слоем, A_{repass}/A_{tr} должна быть пропорциональна отношению времени t_{lat}/t_{reac}, где t_{lat} – промежуток времени между приложениями нагрузки, а t_{reac} – время, необходимое для формирования пассивного слоя и достижения стабилизации потенциала E_{oc}. В этом случае W^c_{act} и W^m_{act} вычисляются из уравнений (4) и (5).

$$A_{act} = \left(1 - \frac{t_{lat}}{t_{reac}}\right) A_{tr}\ .$$

При этом W^c_{repass} рассчитывается из уравнения (2) и во всех уравнениях $t = N\ t_{lat}$, где N - количество циклов скольжения.

Суммарную потерю материала в результате механического износа пассивного слоя получаем по формуле

$$W^m_{repass} = W_{tr} - W^c_{act} - W^m_{act} - W^c_{repass}.$$

Достоинствами данного метода являются проведение испытаний при равновесном электродном потенциале E_{oc} без искусственного изменения электрохимических параметров системы и определение количественных оценок различных компонентов коррозионно-механического износа материала. К недостаткам метода можно отнести возможность применения только для пассивных материалов, возможность проведения исследования только в условиях однонаправленного трения скольжения, а также наличие ряда допущений (использование одинакового значения параметра B для пассивной и активной поверхностей металла, предположение об одинаковых электрохимических свойствах пассивной площади на дорожке трения и в исходной пассивной области).

Анализируя рассмотренные методы, можно сделать следующие выводы:

- При исследовании коррозионно-механического изнашивания целесообразно использовать электрохимические методы, поскольку они позволяют моделировать многие химические характеристики коррозионной среды при одновременном механическом воздействии, что дает возможность оценить вклад коррозии в суммарный износ. Это достигается путем измерения силы тока и последующего расчета по известным достоверным зависимостям.
- Вместе с тем электрохимические методы имеют ряд недостатков. В частности, реальный потенциал в зоне фрикционного контакта может существенно отличаться от накладываемого потенциала вследствие омического падения напряжения. Кроме того, принятие анодного тока

как меры износа образца за счет химического воздействия может быть правомерно только при отсутствии других значимых, кроме коррозионных, химических реакций, приводящих к разрушению или модификации материала образца.

• Несмотря на общность подходов к исследованию электрохимических методов, при их применении возникают серьезные затруднения при выявлении синергизма, интерпретации результатов и формулировании выводов, для чего необходим дополнительный анализ характеристик контактирующих поверхностей и продуктов износа. Для унификации и повышения точности исследований требуется более широкое использование международных и создание отечественных стандартов в части изучения коррозионно-механического изнашивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Памфилов, Е.А. К вопросу моделирования коррозионно-механического изнашивания / Е.А.Памфилов, Я.С.Прозоров // Трение и износ. – Минск, 2012. – Т.33.- № 3. – С. 288-297.
2. ASTM standard G119. Standard guide for determining amount of synergism between wear and corrosion // Annual Book of ASTM Standards. - USA, 2001. -Vol.03.02.
3. Mischler, S. Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: a comparative evaluation / S. Mischler // Tribology International. - 2008. - Vol. 41. - № 7. - P. 573–583.
4. Tribocorrosion of passive metals and coatings / edited by Dieter Landolt and Stefano Mischler. - Woodhead Publishing Limited, Cambridge UK, 2011. – 579 p.
5. Tribocorrosion properties of metallic materials and effects of metal release // Ph. D. Thesis by Morten Stendahl Jellesen. - Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark (DTU), 2007.
6. Pamfilov, E.A. Mechanochemical Facture of the Components of Wood-Cutting Equipment / E.A.Pamfilov, S.V. Lukashov, Ya.S. Prozorov // Material Science. - 2014. - Vol.50. - № 1. - P.148-155.

1. Pamfilov, E.A. On problem of mechano-chemical wear modeling / E.A. Pamfilov, Ya.S. Prozorov // Friction and Wear. – Minsk, 2012. – Vol.33.- № 3. – pp. 288-297.
2. ASTM standard G119. Standard guide for determining amount of synergism between wear and corrosion // Annual Book of ASTM Standards. - USA, 2001. -Vol.03.02.
3. Mischler, S. Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: a comparative evaluation / S. Mischler // Tribology International. - 2008. - Vol. 41. - № 7. - P. 573–583.
4. Tribocorrosion of passive metals and coatings / edited by Dieter Landolt and Stefano Mischler. - Woodhead Publishing Limited, Cambridge UK, 2011. – 579 p.
5. Tribocorrosion properties of metallic materials and effects of metal release // Ph. D. Thesis by Morten Stendahl Jellesen. - Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark (DTU), 2007.
6. Pamfilov, E.A. Mechanochemical Facture of the Components of Wood-Cutting Equipment / E.A.Pamfilov, S.V. Lukashov, Ya.S. Prozorov // Material Science. - 2014. - Vol.50. - № 1. - P.148-155.

Статья поступила в редколлегию 10.03.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Киричек А.В.

Сведения об авторах:

Памфилов Евгений Анатольевич, д.т.н., профессор кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832)74-16-46, e-mail: pamfilov@bgita.ru.
Прозоров Ярослав Сергеевич, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Информационные технологии» БГИТУ, тел.: (4832)68-85-41, e-mail: prozorov@bgita.ru.
Кузнецов Сергей Викторович, к.х.н., доцент, заведующий кафедрой «Химия» БГУ им. акад. И.Г.Петровского, тел.: (4832) 66-65-38, e-mail: passivoxid@mail.ru.
Лукашов Сергей Викторович, к.х.н., доцент кафедры «Химия» БГИТУ, тел.: (4832) 64-96-29, e-mail: SergeLukashov@yandex.ru.

Pamfilov Eugene Anatolievich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering and Material Science” Bryansk State Technical University, Phone: (4832)74-16-46, e-mail: pamfilov@bgita.ru.
Prozorov Yaroslav Sergeyevich, Can.Eng., Senior lecturer of the Dep. “Innovation Technologies” BSITU, Phone: (4832)68-85-41, e-mail: prozorov@bgita.ru.
Kuznetsov Sergey Victorovich, Can.Sc.Chem., Assistant Prof., Head of the Dep. “Chemistry”, Academician Petrovsky BSU, Phone: (4832) 66-65-38, e-mail: passivoxid@mail.ru.
Lukashov Sergey Victorovich, Can.Sc.Chem., Assistant Prof. of the Dep. “Chemistry” of BSITU, Phone: (4832) 64-96-29, e-mail: SergeLukashov@yandex.ru.

УДК 621.822.741.1
DOI: 10.12737/20240

С. П. Шец, В.И. Сакало

ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ

Описано взаимодействие тел качения и колец в шариковых подшипниках качения в присутствии смазочного материала. Рассмотрен процесс образования модифицированного слоя и его влияние на интенсивность изнашивания деталей подшипника качения.

Ключевые слова: смазочный материал, пара трения, коэффициент трения, подшипник качения, триботехнические испытания, модифицированный слой, интенсивность изнашивания.

S.P. Shets, V.I. Sakalo

INFLUENCE OF LUBRICANT ON PROCESSES, PROCEEDING IN ROLLING BEARINGS

Chemically active components which are available both in structure of material of a blanket and in lubricant, decay under the influence of temperature, a force field of a solid body and catalytic impact of a svezheobnazhenny surface of metal, are allocated in the form of active agents who react and form the modified layer. The modified layer has smaller (in comparison with the main metal) resistance to shift owing to what decrease in coefficient of friction and replacement of intensive adhesive wear softer corrosion and mechanical is provided. The condition of details of the rolling bearing in the presence of the modified layer does not change during all service life. However in case of a leakage of lubricant or loss in it chemically active components the modified layer is not formed that leads to metal contact and failure of the bearing. Metal contact causes sharp temperature increase, and also mechanical damages to a type of zadir on bodies of swing and забоин on the rings received as a result of shock loadings.

Intensity of wear of details of the rolling bearing is influenced substantially by the process temperature which depends on the relative speed of sliding and the normal squeezing force. In process of temperature increase of process the speed of education and a share of the modified layer increase. Critical value of temperature determines a lubricant scope. The concentration of an active component in lubricant is higher, the wear resistance of the rolling bearing is higher. When toughening the mode of friction there is a competition of two processes – educations and wear of the modified layer and if wear prevails, then inevitably there will be a metal contact leading to failure of the bearing.

Key words: lubricant, couple of friction, friction coefficient, the rolling bearing, tribotechnical tests, the modified layer, intensity of wear.

В подшипниках качения происходит поворот тел качения или колец относительно постоянных или мгновенных осей, который сопровождается сменой участков взаимного контакта без видимого скольжения. При этом поверхность тела качения как бы развертывается по поверхности кольца. В этом случае качение можно назвать чистым, но обычно оно сочетается с проскальзыванием поверхностей или верчением (спином) деталей, принимая смешанный характер.

Проскальзывание тел качения в шариковых подшипниках происходит потому, что контакт шарика с кольцами осуществляется по некоторой дуге АВА (рис. 1). Окружные скорости точек А и В при вращении шарика вокруг своей оси различны. Если допустить, что в точках А (АА – мгновенная ось) нет скольжения, то оно будет в точке В. Это создает дополнительный износ и потери на трение в шариковых подшипниках. Для снижения интенсивности данных процессов требуется смазочный материал, который выполняет следующие основные функции:

- образует между рабочими поверхностями необходимую упругогидродинамическую масляную пленку, которая одновременно смягчает удары тел качения о кольца и сепаратор, увеличивая этим долговеч-

ность подшипника и снижая шум при его работе;

• уменьшает трение скольжения между поверхностями качения, возникающее вследствие их упругой деформации под действием нагрузки при работе подшипника;

• уменьшает трение скольжения, возникающее между телами качения, сепаратором и кольцами;

• служит охлаждающей средой;

• способствует равномерному распределению тепла, образующегося при работе подшипника, по всему подшипнику и предотвращает этим развитие высокой температуры внутри подшипника;

• защищает подшипник от коррозии;

• препятствует проникновению в подшипник загрязнений из окружающей среды.

Смазочный материал определяет долговечность подшипника не в меньшей мере, чем материал его деталей. Особенно возросла роль смазки с повышением напряженности работы узлов трения, т. е. с повышением частот вращения, нагрузок и температуры (наиболее значительного фактора, обусловливающего долговечность смазочного материала в подшипнике).

Триботехнические испытания закрытых шариковых подшипников качения № 204 с применением пластичных смазочных материалов Castrol LMX и Литол-24 проводились с использованием стенда, описанного в работе [1, С. 10]. В результате испытаний установлено, что при равных условиях нагружения подшипника Castrol LMX обеспечивает значительно большее снижение интенсивности изнашивания (порядка 20%), чем общепринятый смазочный материал Литол-24. «Это объясняется тем, что смазочный материал Castrol LMX лучше удерживается вблизи зоны контакта нагруженных пар трения подшипника и интенсифицирует отвод тепла» [2, С. 34].

Пара трения «тело качения – кольцо» в подшипнике качения работает в режиме граничной смазки, при котором смазочное действие, т.е. обеспечение низких энергетических затрат, требуемой несущей способности и низкой интенсивности изнашивания трущихся тел в заданном интервале температур, скоростей относительного перемещения и нагрузок, осуществляют тончайшие граничные слои, образованные в результате взаимодействия (адсорбции, хемосорбции, химической реакции) активных компонентов смазочной среды с материалом поверхностей трения [3; 4].

Химически активные компоненты, имеющиеся как в структуре материала поверхностного слоя, так и в смазочном материале, разлагаются под действием температуры, силового поля твердого тела и каталитическим воздействием свежеобнаженной поверхности металла, выделяются в виде активных агентов, которые вступают в реакцию и образуют модифицированный слой. Толщина модифицированного слоя, необходимая и достаточная для эффективного разделения поверхностей трения, в данном случае составляет несколько нанометров.

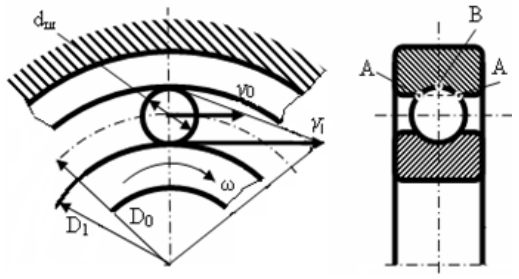


Рис. 1. План скоростей при неподвижном наружном кольце подшипника качения

Таким образом, полученный модифицированный слой имеет меньшее (по сравнению с основным металлом) сопротивление сдвигу, вследствие чего обеспечивается снижение коэффициента трения и замена интенсивного адгезионного изнашивания более мягким коррозионно-механическим.

При наличии смазочного материала в зоне трения взаимодействие происходит полностью по модифицированному слою (рис. 2 а), а при частичном разрушении модифицированного слоя, например абразивом, – частично (рис. 2 б). Если между поверхностями трения смазочный матери-

ал отсутствует, то возникает металлический контакт (рис. 2 в).

Состояние деталей подшипника качения при наличии модифицированного слоя не меняется в течение всего срока службы (рис. 3 а, б). Однако при утечке смазочного материала или утрате в нем химически активных компонентов модифицированный слой не образуется, что приводит к металлическому контакту и отказу подшипника.

Для подтверждения изложенных теоретических выкладок были проведены исследования более 120 подшипников качения, демонтированных с валиков ременных переборов пресс-подборщиков «John Deere 864». В результате исследований поврежденных подшипников установлено, что при эксплуатации происходит разгерметизация подшипникового узла (повреждение уплотнения). «При этом повышается вероятность попадания в зону контакта кварцевых частиц из окружающей среды и утечек рабочей жидкости из уплотняемой полости» [5, С. 28].

Анализ деталей подшипников качения, демонтированных с валиков ременных переборов пресс-подборщиков «John Deere 864», позволяет утверждать, что при разрушении модифицированного слоя образуется металлический контакт. Металлический контакт вызывает резкое повышение температуры, о чем свидетельствует наличие оттенка серого цвета (цвета побежалости) на шариках поврежденных подшипников (рис. 3 в), а также механические повреждения в виде задиров на телах качения и забоин на кольцах, полученных в результате ударных нагрузок (рис. 3 в, г).

В зависимости от наличия или отсутствия модифицированного слоя между поверхностями деталей подшипника качения изменяется и коэффициент трения.

При наличии модифицированного слоя коэффициент трения $f_{Tмс}$ можно определить как [6]

$$f_{Tмс} = \alpha_{мс}\, f_{мс} + (1-\alpha_{мс})\, f_г \qquad (1)$$

где $\alpha_{мс}$ – доля поверхности, находящаяся в контакте по модифицированному слою; $f_{мс}$ – коэффициент трения поверхностей, контактирующих по модифицированному слою; $f_г$ – коэффициент гидродинамического трения.

При частичном разрушении модифицированного слоя (например абразивом)

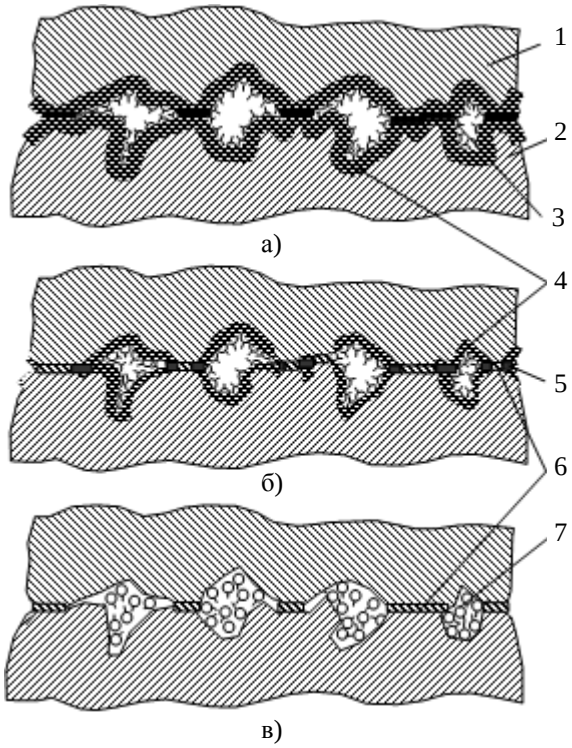


Рис. 2. Схема фрикционного взаимодействия тел: а – при наличии модифицированного слоя; б – при частичном разрушении модифицированного слоя; в – без модифицированного слоя; 1 – тело №1; 2 – тело №2; 3 – активная молекула смазочного материала; 4 – модифицированный слой; 5 – контакт по модифицированному слою; 6 – металлический контакт; 7 – неактивная молекула смазочного материала

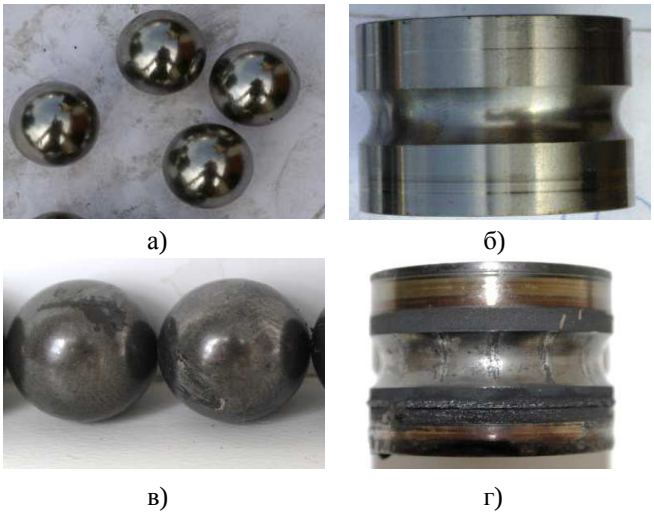


Рис. 3. Детали подшипников качения: тела качения (а) и внутреннее кольцо (б) при наличии модифицированного слоя; тела качения (в) и внутреннее кольцо (г) при отсутствии модифицированного слоя

может появиться и доля металлического контакта. Тогда контакт будет проходить по смешанному слою, а формула (1) примет вид

$$f_{Tcc} = \alpha_{мс}\, f_{мс} + (1 - \alpha_{мс} - \beta)\, f_г + \beta\, f_м,$$

где β – доля поверхности, находящаяся в металлическом контакте; $f_м$ – коэффициент сухого трения в металлическом контакте.

Если поверхность трения и смазочный материал не активны или модифицированный слой разрушен, то коэффициент трения определится как

$$f_{Tc} = (1 - \beta)\, f_г + \beta\, f_м.$$

При отсутствии смазочного материала или утрате в нем химически активных компонентов коэффициент трения будет равен коэффициенту f_{Tc} (металлический контакт).

Доля металлического контакта β в первом приближении может быть определена как [1]

$$\beta = \frac{b_0}{C^V} e^{\left(-\frac{\Delta\mu}{R\,T_{аб}}\right)},$$

где b_0, V – постоянные, зависящие от материалов трущихся тел, определяемые в модельном эксперименте; C – концентрация химически активного компонента в смазочном материале; $\Delta\mu$ – разность химических потенциалов компонента в смазочном материале и материале поверхностного слоя; R – универсальная газовая постоянная; $T_{аб}$ – температура процесса по абсолютной шкале.

Долю поверхности, находящуюся в контакте по модифицированному слою, можно определить как

$$\alpha_{мс} = \frac{A_r}{A_c} - \beta,$$

где A_r – фактическая площадь контакта; A_c – контурная площадь контакта.

На интенсивность изнашивания деталей подшипника качения в значительной степени влияет температура процесса, которая зависит от относительной скорости скольжения и нормальной сжимающей силы. По мере повышения температуры процесса увеличиваются скорость образования и доля модифицированного слоя. Одновременно с этим возрастает и скорость разрушения слоя в результате изнашивания или диссоциации. Если скорость разрушения модифицированного слоя превысит скорость его образования, то через некоторое время будет достигнута критическая доля металлического контакта. В результате произойдет следующее: резкое повышение коэффициента трения; замена коррозионно-механического изнашивания адгезионным; заедание и отказ подшипника. Критическое значение температуры процесса можно определить по формуле [7]

$$T_{кр} = \frac{(E_x + \Delta\mu)}{R \ln\left[\dfrac{B_1 N}{C^n\, \upsilon^m\, H}\right]},$$

где $T_{кр}$ – критическая температура смазочного материала при трении; E_x – энергия активации процесса образования металлических связей между контактирующими поверхностями; N – нормальная сжимающая сила; υ – скорость относительного перемещения поверхностей; H – твердость более мягкого элемента пары трения; B_1, n, m – константы уравнения.

Критическое значение температуры определяет область применения смазочного материала. Чем выше концентрация C активного компонента в смазочном материале, тем выше износостойкость подшипника качения. При ужесточении режима трения происходит конкуренция двух процессов – образования и изнашивания модифицированного слоя, и если изнашивание будет превалировать, то неизбежно возникнет отказ подшипника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горленко, А.О. Метод испытания подшипников качения на трение и изнашивание / А.О. Горленко, М.Л. Клюшников, С.П. Шец // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2010. – №1(25). – С.10-12.
2. Шец, С.П. Трибологические испытания смазочных материалов в подшипниках качения / С.П. Шец // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – №1(29). – С. 32-34.
3. Буяновский, И.А. Граничная смазка / И.А. Буяновский, И.Г. Фукс, Т.Н. Шабалина. – М.: Нефть и газ, 2003. – 248 с.
4. Крагельский, И.В. Узлы трения машин: справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
5. Шец, С.П. Повышение герметизирующей способности манжет комбинированием с магнитожидкостным уплотнением / С.П. Шец // Вестник Брянского государственного технического университета. –2007. – №2(14). – С.27-31.
6. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для техн. вузов / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
7. Васильев, Ю.Н. Модель заедания при граничной смазке / Ю.Н. Васильев // Расчетно-экспериментальные методы оценки трения и износа. – М.: Наука, 1980. – С. 65 – 69.

1. Gorlenko, A.O. A test method of rolling bearings on friction and wear / A.O. Gorlenko, M. L. Klyushnikov, S. P. Shets//Bulletin of Bryansk state technical university. – 2010. – No. 1(25). – P. 10-12.
2. Shets, S. P. Tribological tests of lubricants in rolling bearings / S. P. Shets//the Bulletin of Bryansk state technical university. – 2011. – No. 1(29). – P. 32-34.
3. Buyanovsky, I.A. Boundary greasing / I.A. Buyanovsky, I.G. Fuchs, T.N. Shabalin. – M.: Oil and gas, 2003. – 248 p.
4. Kragelsky, I.V. Frictional units of cars: reference book / I.V. Kragelsky, N. M. Mikhin. – M.: Mechanical engineering, 1984. – 280 p.
5. Shets, S. P. Increase of the pressurizing ability of cuffs a combination with magnetoliquid consolidation / S. P. Shets//the Bulletin of Bryansk state technical university. –2007. – No. 2(14). – P. 27-31.
6. Tribology bases (friction, wear, greasing): studies. for техн. higher education institutions / A.V. Chichinadze, E.D. Brown, N. A. Bush [etc.]; under a general edition of A.V. Chichinadze. – 2nd prod., reslave. and additional – M.: Mechanical engineering, 2001. – 664 p.
7. Vasilyev, Yu.N. Model of jamming at boundary greasing / Yu.N. Vasilyev//Settlement and experimental methods of an assessment of friction and wear. – M.: Science, 1980. – P. 65 – 69.

Статья поступила в редколлегию 15.02.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Бишутин С.Г.

Сведения об авторах:

Шец Сергей Петрович, д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-31.
Сакало Владимир Иванович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Механика, динамика и прочность машин» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-86-37, e-mail: sakalo@tu-bryansk.ru.

Shets Sergey Petrovich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Motor Transport” Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 58-82-31.
Sakalo Vladimir Ivanovich, D.Eng., Prof., Head of the Dep. “Mechanics, Dynamics and Machine Durability” Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-86-37, e-mail: sakalo@tu-bryansk.ru.

УДК 621.891
DOI: 10.12737/20241

С.П. Шец, В.И. Сакало, А.Г. Суслов

ВЗАИМОСВЯЗЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ С АБРАЗИВНЫМ ИЗНАШИВАНИЕМ ИХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрено влияние герметичности подшипниковых узлов трения на износостойкость их трибосопряжений типа «вал - уплотнение» в статическом, переходном (стартовом) и динамическом режимах, а также типов «кольцо – тело качения» и «вал – втулка» в зависимости от концентрации абразива в смазочном материале.

Ключевые слова: смазочный материал, износостойкость, интенсивность изнашивания, абразивное изнашивание, трибосопряжение, герметичность, узел трения.

S.P. Shets, V.I. Sakalo, A.G. Suslov

CORRELATION OF BEARING FRICTION ASSEMBLIES WITH ABRASIVE WEAR OF THEIR TRIBO-COUPLING

To ensure wear resistance of all tribo-couplings of a bearing assembly at the expense of the abrasive wear decrease it is necessary the solution of problems connected with the impermeability of their movable joints. In this case by the impermeability we imply a process of sealed “wall” formation which is able to separate reliably volumes with different environments at considerable changes of external factors of environment: temperature, dustiness, aggressiveness and others.

The contact of two hard surfaces of tribo-coupling of the “shaft-seal” type forms a system of cavities, capillaries of an arbitrary shape and contact patches. Under the action of pressure difference on separate capillaries arise leaks.

The depressurization of bearing friction assemblies (leak moment) results in the decrease of wear rate of tribo-coupling of “shaft-seal” type, but a wear rate of other tribo-couplings such as “ring-solid of rolling motion”, for frictionless bearings or “shaft-bushing” for friction bearings increases because of abrasive penetration into a contact area. The penetration of quartz particles (pollutions) through a sealing into a bearing assembly results in the increase of a constant of friction and initiation of abrasive wear in tribo-couplings of “ring-solid of rolling motion” and “shaft-bushing” types. The wear rate of “ring-solid of rolling motion” and “shaft-bushing” couplings depends on the abrasive concentration in lubricant and a leak at the outlet from the bearing assembly. For the wear resistance increase in tribo-couplings of bearing assemblies it is necessary not only to increase the hardness of contact surfaces, ensure optimum roughness, select materials in tribo-couplings, but also to ensure the impermeability and lubricant keeping in a friction area.

Key words: lubricant, wear resistance, wear rate, abrasion, tribo-coupling, impermeability, friction assembly.

Изнашивание подшипниковых узлов трения сопровождается износом всех составляющих их конструкцию трибосопряжений. Механизм изнашивания каждого трибосопряжения представляет сложный процесс, который приводит к изменению линейных размеров сопрягаемых деталей. Процессы, сопровождающие изнашивание, имеют различные виды и формы. Одним из превалирующих видов изнашивания трибосопряжений является абразивный, который вызывает прямое разрушение поверхностного слоя материала в каждый данный момент времени.

Абразивом являются как продукты изнашивания самих поверхностей трения, так и кварцевые частицы, проникающие из окружающей среды в зону контакта трибосопряжений подшипникового узла. Результатом взаимодействия абразивных частиц с изнашиваемой поверхностью являются сопутствующие процессы, сопровождающиеся выделением тепла, увеличением плотности дислокаций в рабочем слое материала, структурными превращениями и др. При наличии абразива возможны различные формы деформации поверхностей деталей: упругое и пластическое деформирование, оттеснение, резание или вырывание материала. Следует отметить, что на процесс абразивного изнашивания могут влиять природа происхожде-

ния абразивных частиц, высокая температура, давление и другие факторы. Общим для абразивного изнашивания является механический фактор разрушения поверхности.

Для обеспечения износостойкости всех трибосопряжений подшипникового узла за счет снижения действия абразивного износа необходимо решение задач, связанных с герметичностью их подвижных соединений. В данном случае под герметичностью понимается процесс создания герметичной «стенки», которая способна надежно разделять объемы с различными средами при значительном изменении внешних факторов окружающей среды: температуры, запыленности, агрессивности и др.

Герметичность подвижных соединений обеспечивается таким техническим устройством, как уплотнение, которое, в свою очередь, также подвержено действию процесса изнашивания. Например, разгерметизация уплотнения подшипникового узла трения качения на этапе эксплуатации приводит к следующим браковочным признакам подшипника: абразивное изнашивание поверхностей качения контртел, наклеп и фреттинг-коррозия посадочных поверхностей, перегрев (наличие цветов побежалости на рабочих поверхностях), проворачивание колец в посадочных гнездах и скалывание направляющих буртиков. Завершающей стадией изнашивания подшипникового узла является утечка смазочного материала и полное разрушение его конструкции.

Основные закономерности взаимосвязи износа и герметичности самих контактных уплотнений можно представить графически (рис. 1). Герметичность подвижных соединений в значительной степени зависит от износа контактирующих элементов уплотнений. В процессе приработки (рис. 1, период I) происходит интенсивное изнашивание микронеровностей на поверхностях трения трибосопряжений, но одновременно с этим увеличивается смачиваемая герметизирующей жидкостью (смазочным материалом) площадь трения, и контактное давление распределяется более равномерно. Это приводит к снижению скорости изнашивания и возрастанию степени герметичности уплотнения. В процессе дальнейшей эксплуатации (рис. 1, период II) смачиваемая площадь остается постоянной, а постепенный износ контактирующего элемента приводит к снижению контактного давления и, как следствие, потере герметичности. В точке K наступает критическое повреждение контактирующих поверхностей, при котором увеличение зазоров в трибосопряжении вследствие износа не удается компенсировать за счет контактного давления.

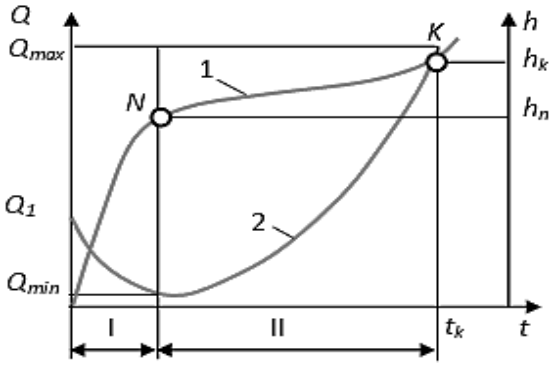


Рис. 1. Зависимость линейного износа и утечек от времени работы контактного уплотнения: h_k и h_n – величины линейного износа, критическая и после приработки; t_k – ресурс уплотнения; Q_1, Q_{min} и Q_{max} – исходная, минимальная и предельно допустимая величины утечек; 1 – линейный износ; 2 – утечки

Если рассмотреть работу уплотнения в течение одного цикла (статический режим (поверхности трения не имеют относительного перемещения) – переходный режим (старт) – динамический режим (номинальная скорость относительного перемещения поверхностей трения) – переходный режим (останов)), то зависимость скорости изнашивания и утечек от времени имеет своеобразный характер (рис. 2).

Механизм утечек в течение одного цикла работы уплотнения резко различается, так как изменяются режимы трения (трение покоя, трение движения) и смазки (граничный, смешанный, гидродинамический). В статическом режиме работы уплотнения герметичность определяется утечками через неплотности и микроканалы между неподвижными поверхностями уплотнителя и детали, которые возникают вследствие шероховатости поверхностей и наличия дефектов, температурных и силовых деформаций.

Соприкосновение двух твердых поверхностей образует систему впадин, капилляров произвольной формы и пятен касания. При действии перепада давлений по отдельным капиллярам возникают утечки Q. Кроме того, происходит контактная диффузия, приводящая к процессам адгезии неподвижных поверхностей.

Например, при останове машины из-за прекращения действия трения температура подшипниковых узлов снижается при постоянном объеме. Во внутренней полости узла создается разрежение, что приводит к возникновению перепада давлений.

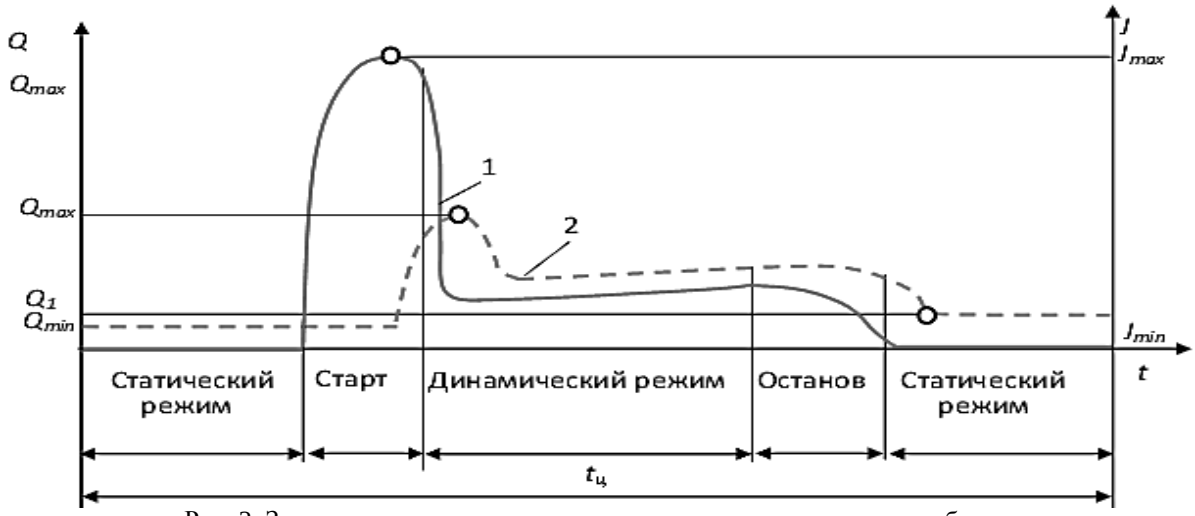


Рис. 2. Зависимость скорости изнашивания и утечек от времени работы контактного уплотнения: 1 – скорость изнашивания; 2 – утечки

Суммарное значение утечек можно определить как [1]

$$Q = \psi_0 \frac{B}{l} \frac{\Delta p}{\mu} Rz^3 e^{-3\overline{p_k}/(kE)},$$

где $\psi_0 = 0{,}5 \cdot 10^{-8} ... 10^{-6}$ и $k = 0{,}1...0{,}3$ – коэффициенты, зависящие от качества поверхности; B и l – периметр и ширина контактирующих поверхностей; Δp – перепад давлений; μ – динамическая вязкость среды; Rz – шероховатость поверхности контртела; $\overline{p_k}$ – среднее контактное давление; E – модуль упругости материала уплотнения.

Износ при этом практически отсутствует и не имеет взаимосвязи с герметичностью.

В переходном режиме «старт» сначала в течение долей секунды происходит адгезионное изнашивание контактирующего элемента, а затем раскрытие зазора в трибосопряжении, сопровождающееся интенсификацией утечки (обычно внутрь подшипникового узла). В этом случае толщина изношенного слоя, например для полимерных материалов, за первоначальный период

$$\Delta h = (0{,}5...3) Rz .$$

Удельные утечки за последующий малый период можно определить как для бесконтактного уплотнения:

$$\overline{Q_m} = \psi \frac{\Delta p}{\mu\, l} S_n^3,$$

где $\psi = 0{,}1...0{,}2$ – безразмерный коэффициент формы; S_n – зазор в трибосопряжении.

Тогда

$$S_n = Rz + 0{,}1 Rz \left(\frac{\upsilon\, \mu}{p_k\, Rz} \right)^{2/3} .$$

Износ трибосопряжений типа «вал - уплотнение» в переходном режиме практически не имеет стойкой взаимосвязи с величиной утечек, так как возникает в первоначальный период времени (до возникновения утечек).

Утечки смазочного материала из-за нагрева в режиме останова, например для трибосопряжения типа «вал - уплотнение», можно определить как

$$Q = \pi\, d_в \sqrt{\mu\, \upsilon / \overline{p_k}},$$

где $d_в$ – диаметр вала.

Среднее контактное давление на контактирующем элементе уплотнения можно вычислить по формуле [2]

$$\overline{p_k} = \overline{P}/a.$$

Интенсивность изнашивания трибосопряжения «вал - уплотнение» с учетом уравнения, полученного в работе [3], определится как

$$I_h = \frac{0{,}15\,\gamma_u}{\pi\, d_в\, N_{об}\, \rho\, \Delta S^* \left[\dfrac{T_в\, Q^2}{\mu\, \upsilon^2 (\pi\, d_в)^2\, f_{грс}} + \dfrac{a}{\sqrt{\lambda_в\, \lambda_м}\, \sqrt{Bi}} \right]}. \qquad (1)$$

Из формулы (1) следует, что с уменьшением утечек в динамическом режиме интенсивность изнашивания значительно увеличивается. Поэтому при разработке новых конструкций подшипниковых узлов следует решать задачу оптимизации процессов изнашивания и герметизации.

Разгерметизация подшипниковых узлов трения приводит к снижению интенсивности изнашивания трибосопряжений типа «вал – уплотнение», однако интенсивность изнашивания других трибосопряжений, таких как «кольцо – тело качения» для подшипников качения или «вал – втулка» для подшипников скольжения, резко повышается из-за проникновения абразива в зону контакта.

Утечка смазочного материала из подшипникового узла через уплотнение с одновременным проникновением кварцевых частиц через уплотнение в подшипниковый узел приводит к повышению коэффициента трения и возникновению абразивного или гидроабразивного износа главных элементов подшипникового узла.

Интенсивность изнашивания трибосопряжений «кольцо – тело качения» и «вал – втулка» зависит от концентрации абразива в смазочном материале и утечек на входе в подшипниковый узел, связанных с проникновением кварцевых частиц, и может быть выражена общей функциональной зависимостью

$$I_h = F(C_a, Q, \upsilon),$$

где C_a – концентрация абразивных частиц в смазочном материале; Q – утечки смазочного материала; υ – скорость скольжения.

Для повышения износостойкости трибосопряжений подшипниковых узлов необходимо не только повышение твердости контактирующих поверхностей, обеспечение оптимальной шероховатости, подбора материалов в трибосопряжениях, но и обеспечение герметичности и удержания смазочного материала в зоне трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондаков, Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.В. Гордеев [и др.]; под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.
2. Шец, С.П. Повышение герметизирующей способности манжет комбинированием с магнитожидкостным уплотнением/ С.П. Шец// Вестник Брянского государственного технического университета. – 2007. - №2(14). – С. 27-31.
3. Шец, С.П. Интенсивность изнашивания манжет в трибосопряжении типа «вал – уплотнение» / С.П. Шец // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2009. - №2(22). – С. 9-12.

1. Kondakov, L.A. Seals and Sealing Systems: Reference Book / L.A. Kondakov, A.I. Golubev, V.V. Gordeyev [et al.]; under the general editorship of A.I. Golubev, L.A. Kondakov. – 2-d Edition, revised and supplemented – M.: Mechanical Engineering, 1994. – pp. 448.
2. Shets, S.P. Sealing property increase in cups by combining with magnetic fluid seal/ S.P. Shets// Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2007. - №2(14). – pp. 27-31.
3. Shets, S.P. Cup wear rate in tribo-coupling of “shaft-seal” type / S.P. Shets // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2009. - №2(22). – pp. 9-12.

Статья поступила в редколлегию 15.02.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Бишутин С.Г.

Сведения об авторах:

Шец Сергей Петрович, д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-31.
Сакало Владимир Иванович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Механика, динамика и прочность машин» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-86-37, e-mail: sakalo@tu-bryansk.ru.
Суслов Анатолий Григорьевич, д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Shets Sergey Petrovich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Motor Transport” Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 58-82-31.
Sakalo Vladimir Ivanovich, D.Eng., Prof., Head of the Dep. “Mechanics, Dynamics and Machine Durability”
Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-86-37, e-mail: sakalo@tu-bryansk.ru.
Suslov Anatoly Grigorievich, D.Eng., Prof. of Bauman State Technical University of Moscow.

УДК 621.923.6
DOI: 10.12737/20242

В.А. Панайоти

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТВЕРДОЙ СМАЗКИ НА ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ЗАТОЧКЕ

Рассмотрен механизм упрочнения поверхности быстрорежущей стали при шлифовании. Разработана методика комплексного исследования физико-механических свойств приповерхностных слоев. Представлены результаты исследования при использовании смазочного материала. Проанализирован механизм структурных и фазовых превращений и показана эффективность применения твердых смазочных материалов в процессе обработки.

Ключевые слова: твердая смазка, эльборовый круг, заточка, быстрорежущая сталь, наклеп, глубина наклепа, степень наклепа.

V.A. Panayoty

ANALYSIS OF SOLID LUBRICATION EFFECT UPON SURFACE HARDENING OF HIGH-SPEED STEEL TOOLS DURING SHARPENING

The mechanism of high-speed steel surface hardening during grinding is considered, the system for a complex investigation of physic-stress-strain properties of surface layers is developed and the investigation results at the oil use are presented. It is determined that the value and degree of cold-hardening of a high-speed steel surface layer is a thermo-dependent process, the mechanism of structural and phase changes is analyzed and the efficiency of solid lubrication use in working process is shown. Oil coating on an abrasive tool during results in a natural decrease of cold-hardening at all values of a cross-feed motion. This is caused both by cutting force decrease, and by the decrease of grinding temperature because of the friction force reduction at the interaction of high-speed steel with an oiled disk. The regularities of austenite quantity changes after steel grinding under different conditions confirm phase changes influence upon a value and a degree of cold-hardening. The results obtained allow choosing reasonably cutting modes and characteristics of cBN disks at oil coating during sharpening.

Key words: solid lubrication, cBN disk, sharpening, high-speed steel, cold-hardening, cold-hardening depth, cold-hardening degree.

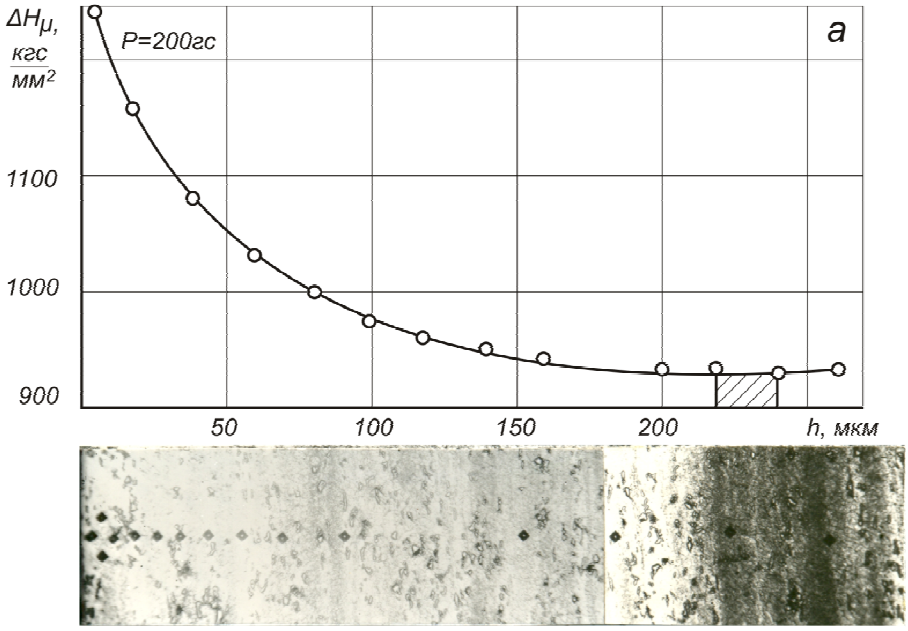
Быстрорежущая сталь является одним из основных материалов, применяемых для изготовления лезвийных режущих инструментов, и отличается высокой надежностью при эксплуатации и технологичностью при изготовлении, что особенно важно для использования в условиях автоматизированного производства. Однако современные марки этой стали имеют два существенных недостатка: узкий диапазон температуры для нагрева под закалку и зависимость качества поверхностного слоя от условий шлифования [1]. Одной из ответственных операций является заточка и доводка режущего инструмента, при которой к поверхности лезвия инструмента предъявляются особо высокие требования по шероховатости, твердости приповерхностных слоев и фазовому составу. Поэтому исследование состояния поверхностных слоев лезвийных режущих инструментов после заточки имеет важное значение, особенно в отсутствие возможности применения смазочно-охлаждающих жидкостей. Использование твердых смазок, наносимых в процессе шлифования, позволяет наряду с улучшением режущей способности абразивного инструмента значительно улучшить и качественные показатели обработанной поверхности [2 - 4].

Исследованию процессов, происходящих при заточке в поверхностных слоях быстрорежущей стали в условиях нанесения твердого смазочного материала, и посвящена данная статья.

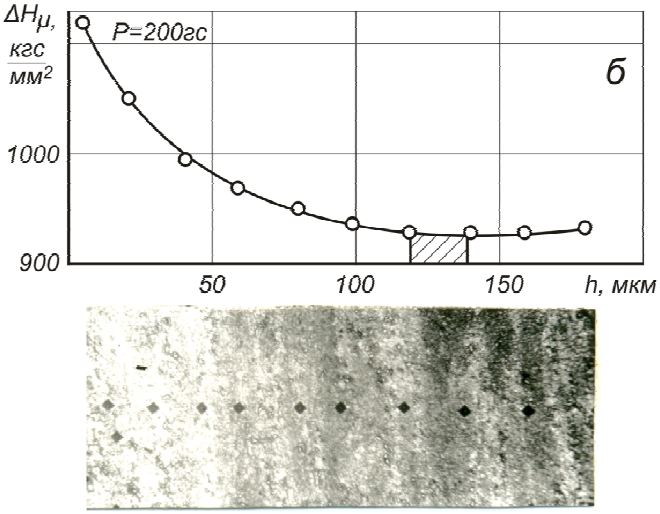
Исследования проводили на универсальном модернизированном заточном станке модели 3А64Д, оснащенном при-

способлением для нанесения твердого смазочного материала с заданным расходом смазки. Микроструктуру и поверхностное упрочнение шлифованной поверхности быстрорежущей стали изучали металлографическим и микродюрометрическим методами, для чего приготовляли косые шлифы, позволяющие наблюдать приповерхностный слой на разной глубине. Для выявления микроструктуры выполняли химическое травление раствором азотной кислоты. Поверхностный слой исследовали путем измерения микротвердости вдавливанием алмазной пирамиды на приборе ПМТ-3. Температуру контролировали с помощью термопары. Для изучения закономерностей влияния технологических факторов шлифования на изменение фазового состава поверхности быстрорежущей стали был проведен рентгеноструктурный анализ ионизационным методом на дифрактометре ДРОН-I.

На рис. 1 представлена микроструктура поверхностного слоя стали Р9Ф5 при обычном сухом шлифовании (а) и с нанесением твердой смазки (б).



а)



б)

Рис. 1. Микроструктура и микротвердость поверхностного слоя стали Р9Ф5 после шлифования кругом ЛО8 С1 100% С10 (V=19 м/с; S=1 м/мин; t=0,02 мм/дв.ход): а – без нанесения смазки; б – со смазкой

При травлении выявляется светлая приповерхностная зона, степень травимости которой увеличивается по мере удаления от поверхности образца. Плохая травимость поверхностного слоя объясняется пластическим деформированием поверхности обрабатываемого металла (наклепом) в результате контактного силового взаимодействия зльборового инструмента со шлифуемым материалом. Глубину наклепа шлифованной стали уточняли по изменению микротвердости от поверхности к центру образца. Из кривых распределения микротвердости по глубине видно, что при использовании предложенной композиции смазки значение микротвердости шлифованной поверхности стали Р9Ф5 уменьшается с 1250 до 1130 кгс/мм^2, что свидетельствует о снижении величины пластической деформации металла примерно на 10%.

Экспериментальные данные распределения микротвердости по глубине наклепанной зоны были обработаны в полулогарифмических координатах lg ΔH_μ – h, где $\Delta H\mu$ – разность значений микротвердости на поверхности металла и в его сердцевине. В указанных координатах были получены прямые линии. Следовательно, распределение микротвердости в зоне наклепа имеет экспоненциальный характер, т.е. описывается уравнениями: при шлифовании с твердой смазкой - ΔH_μ = 213, 1 exp (-0,01h), без нее - ΔH_μ = 357 exp (-0,01h).

Экспоненциальный закон изменения микротвердости по глубине дефектного слоя свидетельствует о том, что процесс деформирования металла при шлифовании является термически активируемым, а следовательно, контролируется изменением температуры от поверхности к центру образца.

При увеличении поперечной подачи от 0,01 до 0,04 мм/дв.ход глубина деформированной зоны возрастает после шлифования с применением смазки с 75 до 180 мкм, а без нее – с 160 до 230 мкм. Наблюдаемое снижение глубины деформированного слоя при нанесении смазочного материала на режущую поверхность эльборового круга в 1,3-2,1 раза обусловлено уменьшением контактной температуры при шлифовании, а также тангенциальной составляющей силы резания.

На рис. 2 показано изменение величины наклепа стали Р9Ф5 при шлифовании с различной поперечной подачей. Как в условиях обычного шлифования (рис. 2а), так и при нанесении смазки (рис. 2б) полученные кривые носят экстремальный характер. Максимальная величина наклепа наблюдается при подаче 0,02 мм/дв.ход; затем рассматриваемая характеристика монотонно убывает.

Чем больше поперечная подача, тем выше должна быть степень пластической деформации поверхностного слоя, вследствие увеличения силы резания и контактной температуры [4]. Однако деформированное состояние металла является термодинамически неустойчивым. При определенной термической активации самопроизвольно происходят явления, возвращающие металл в более устойчивое структурное состояние (возврат). Снятие искажений кристаллической решетки и другие внутризерновые процессы особенно активно протекают при повышении температуры. Это происходит на первой стадии устранения следов наклепа при нагреве, называемой отдыхом (начальная стадия возврата).

Следует отметить, что отдых протекает не в процессе деформации, а сразу же после её окончания и тем быстрее, чем выше температура [5; 6]. Следовательно, температура при шлифовании, с одной стороны, способствует повышению величины пластической деформации (наклепа), а с другой - снимает наклеп. Такое двойственное влияние температуры и определяет характер изменения величины наклепа поверхностного слоя.

Определенное влияние на снижение микротвердости может оказывать и появление дополнительного количества аустенита за счёт превращения части мартенсита при температурных флуктуациях [7]. Чем выше температура в зоне резания, тем больше образуется аустенита, который, обладая низкими прочностными свойства-

ми, способствует снижению микротвердости шлифованной поверхности быстрорежущей стали. Действием всех указанных факторов объясняется появление максимума на кривых, представленных на рис. 2б.

Нанесение смазочного материала на абразивный инструмент в процессе шлифования приводит к закономерному снижению величины наклепа при всех значениях поперечной подачи. Это вызвано снижением как силы резания, так и температуры шлифования (рис. 3а) вследствие уменьшения сил трения при взаимодействии быстрорежущей стали со смазанным кругом. Закономерности изменения количества аустенита после шлифования стали в разных условиях подтверждают влияние фазовых превращений на глубину и степень наклепа (рис. 3б).

Аналогичные кривые распределения микротвердости в деформированной зоне металла получены и проанализированы для исследованных марок быстрорежущей стали после шлифования на различных режимах эльборовыми кругами разной зернистости и твердости.

Установлено, что при изменении как технологических факторов, так и характеристик абразивного инструмента основные полученные закономерности соблюдаются, но реализуются в значительно меньшей степени, что объясняется облегчением силовой и температурной нагрузки.

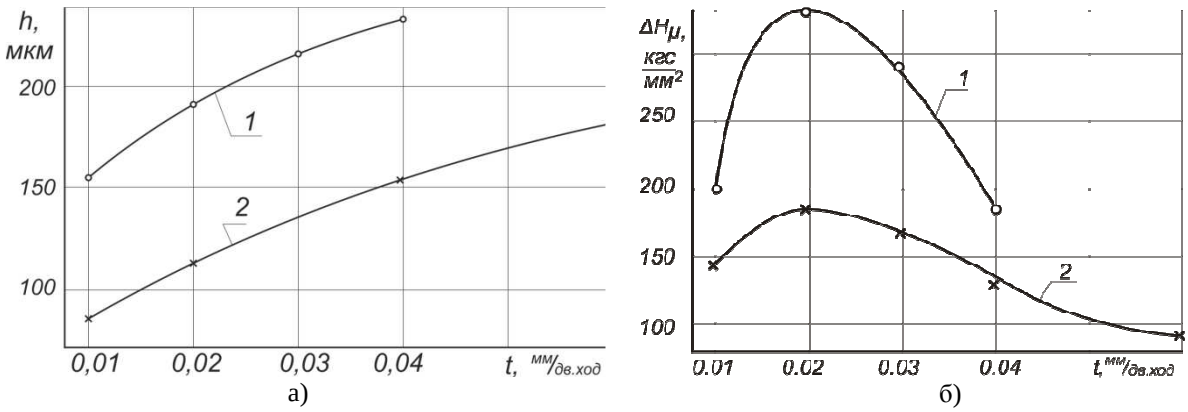


Рис. 2. Изменение глубины (а) и степени наклепа (б) стали Р5Ф5 после шлифования с различной поперечной подачей кругом ЛО8 С1 100% С10 (V=19 м/с; S= 1 м/мин): 1 – без нанесения смазки; 2 – с нанесением смазки

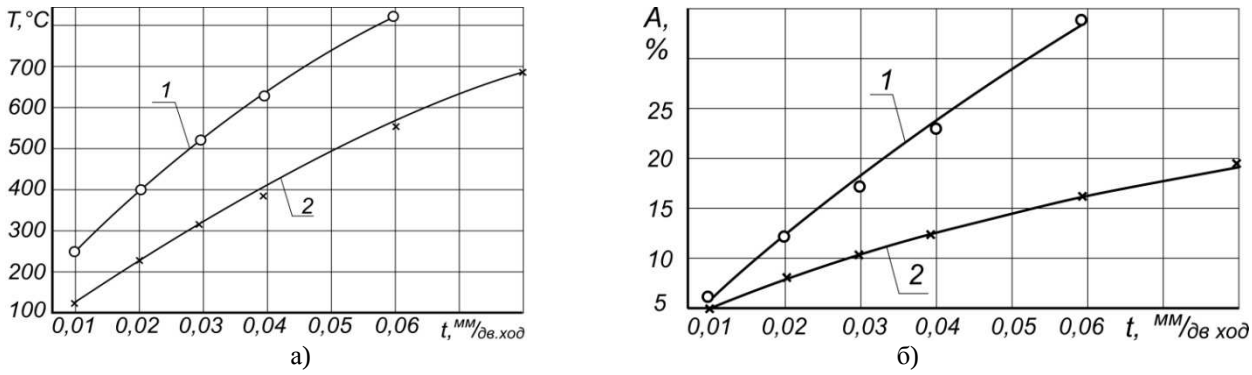


Рис. 3. Изменение температуры (а) при шлифовании и количества аустенита (б) после шлифования стали Р5Ф5 с различной поперечной подачей кругом ЛО8 С1 100 % С10 (V=19 м/с; S= 1 м/мин): 1 – без нанесения смазки; 2 – с нанесением смазки

Таким образом, установлено, что наклеп поверхностного слоя быстрорежущей стали является термозависимым процессом, проанализирован механизм структурных и фазовых превращений и показана эффективность применения твердых смазочных материалов в процессе обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. – 5-е изд. - М.: Металлургия, 1983. - 568 с.
2. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / под общ.ред. Л.В. Худобина. - М.: Машиностроение, 2006.-544 с.
3. Панайоти, В.А.Разработка состава твердой смазки для заточки инструмента из сверхтвердых материалов / В.А. Панайоти // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. междунар. науч. конф. (г. Москва, июнь 2010 г.). - М.: Машиностроение, 2010. – С. 173-175.
4. Панайоти, В.А. Повышение эффективности шлифования при использовании твердых смазок / В.А. Панайоти // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: науч. тр. 11-й междунар. науч. конф. - М.: ИМАШ РАН,2012. – С.337-338.
5. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
6. Кушнир, А.П. Имитационное моделирование прохождения твердого тела через преграду / А.П. Кушнир //Вестник МГТУ МИРЭА. – 2015. - № 4 (9). – Т. 2. – С. 116-126.
7. Влияние твердых смазок на фазовый состав шлифованной поверхности быстрорежущих сталей: Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: науч. тр. IV-й междунар. науч. конф. - М.: ИМАШ РАН.; Спектр, 2015. – С.189-190.

1. Heller Yu.A. Tool Steels / Yu.A. Heller. – 5-th Edition. - M.: Metallurgy, 1983. – pp. 568.
2. Lubricant-Cooling Agents and Their Application at Cutting: Reference Book / under the general editorship of L.V. Khudobin. - M.: Mechanical Engineering, 2006.- pp.544.
3. Panayoty, V.A. Solid lubricant composition for superhard alloy tool sharpening / V.A. Panayoty // Fundamental investigations and innovation technologies in mechanical engineering: Proceedings of Inter. Scientific Conf. (Moscow, June, 2010). - M.: Mechanical Engineering, 2010. – pp. 173-175.
4. Panayoty, V.A. Grinding efficiency increase at solid lubricant use / V.A. Panayoty // Proceedings of the 11th Inter. Scientific Conf. Fundamental Investigations and Innovation Technologies in Mechanical Engineering: M.: IMASH RAS,2012. – pp. 337-338.
5. Storozhev, M.V. Metal Forming Theory / M.V. Storozhev, E.A. Popov. – M.: Mechanical Engineering, 1977. – pp. 423.
6. Kushnir, A.P. Simulation of solid passing though barrier / A.P. Kushnir //Bulletin of MSTU MIREA. – 2015. - № 4 (9). – Vol. 2. – pp. 116-126.
7. Solid lubricant influence upon phase composition of high-speed steel grinded surface: Fundamental investigations and innovation technologies in mechanical engineering: Proceedings of IVth Inter. Scientific Conf. - M.: IMASH RAS: Spectrum, 2015. – pp.189-190.

Статья поступила в редколлегию 15.03.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Киричек А.В.

Сведения об авторах:

Панайоти Владимир Александрович, к.т.н., доцент Московского технологического университета, e-mail: lek00@mail.ru.

Panayoty Vladimir Alexandrovich, Can.Eng., Assistant Prof. of Moscow Technological University, e-mail: lek00@mail.ru.

УДК 621.793
DOI: 10.12737/20243

В.П. Матлахов, А.Н. Игнатов, А.Г. Суслов

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЦЕНТНОГО СОСТАВА КОМПОНЕНТОВ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Рассмотрены алгоритмы обработки изображения. Предложена практическая реализация программного модуля для определения процентного состава компонентов в нитрид-титановых покрытиях по фотографии. Исследована взаимосвязь качества поверхностного слоя и износостойкости с условиями напыления покрытий TiN.

Ключевые слова: программный модуль, бинаризация изображений, пороговая обработка изображений, износостойкие покрытия, процентный состав компонентов.

V.P. Matlakhov, A.N. Ignatov, A.G. Suslov

SOFTWARE MODULE DEVELOPMENT FOR DEFINITION OF PERCENTAGE COMPOSITION IN ANTIWEAR COATINGS

For the analysis of material property changes depending on external factors in materials science there is used a method of the micro-structure analysis of material obtained with the aid of a special optic or electronic microscope. Recently the increasing distribution and application have obtained program-hardware complexes for the automation of metallographic researches which allow speeding up considerably this process. The basis for the development of such complexes is a technology of technical (computer) vision – the theory for the creation of models and algorithms which can carry out the detection and classification of objects and also the processing all research data. For the efficient change of FOP parameters, and also to ensure a convergence (repetition) of test results it is necessary to ensure the authenticity of research data processing. It is achieved by means of the application of a specially developed software module for the definition of percentage composition in nitride-titanium and other wear-resisting coatings according to Photomath photographs. As input data for the software module there are used coating microstructure photos obtained with the aid of PMT-3M hardness meter. In the module mentioned all essential transformations for the further computation of a percentage composition with the obtaining of a result for a user and also saving in a database are carried out.

Key words: software module, image binarization, image threshold processing , wear-resisting(antiwear) coatings, percentage composition.

Развитие современной техники предполагает применение новых материалов, обладающих специальными свойствами (тугоплавкие, высокопрочные, коррозионно-стойкие и др.), а также совершенствование технологий упрочнения. Одной из технологий нанесения покрытий являются методы физического осаждения покрытий (ФОП), получившие в мировой практике название PVD (phisical vapor deposition)[1]. Создание новых материалов и способов их обработки должно базироваться на знаниях о внутренних процессах и превращениях, происходящих в ходе производства и эксплуатации изделий, что обусловливает необходимость комплексного использования всех современных методов исследования, в том числе и структурных методов анализа. Для изучения изменения свойств материалов в зависимости от внешних факторов в материаловедении (металловедении) используется метод изучения изображения микроструктуры материала, полученного при помощи специального оптического или электронного микроскопа. Микроанализ позволяет характеризовать размеры и расположение различных фаз, присутствующих в сплавах. Размеры компонентов (зерен) определяются либо методами количественной металлографии, либо путем сопоставления структуры с заранее составленными шкалами.

В лаборатории УНТИ БГТУ ведутся работы по изменению свойств материалов методом физического осаждения покрытий. Это высокоэффективный

способ поверхностного упрочнения тяжелонагруженных деталей, эксплуатирующихся, как правило, при высоких температурах в условиях контактных взаимодействий. Разработана методика технологического процесса, включающего себя: вакуумное испарение тугоплавкого металла (титана), его ионизацию, подачу реакционного газа, химические и плазмохимические реакции, конденсацию покрытия на рабочих поверхностях образцов. В настоящее время проведены опытные исследования с целью определения взаимосвязи качества поверхностного слоя и износостойкости с условиями электромеханической обработки нитрид-титановых покрытий [2-5].

В последнее время все большее распространение и применение находят программно-аппаратные комплексы для автоматизации металлографических исследований, которые позволяют значительно ускорить этот процесс. Основой для разработки таких комплексов является технология технического (компьютерного) зрения - теория создания моделей и алгоритмов, которые могут выполнять обнаружение и классификацию объектов, а также обработку всех данных исследования.

Для исследования микроструктуры напыленного покрытия на процент дефектных составляющих в фазе TiN (капельная фаза α-Ti, открытые поры, отслоения, наплывы) линейным методом Розиваля на приборе ПМТ-3М с общим увеличением окуляра и ахроматического эпиобъектива, равным 487х, осуществлялось фотографирование образцов с последующим анализом данных. Для оперативного изменения параметров ФОП, а также для обеспечения сходимости (повторяемости) результатов испытаний необходимо обеспечить достоверность обработки данных исследования. Это достигается применением специально разработанного программного модуля для определения процентного состава компонентов в нитрид-титановых и других износостойких покрытиях по фотографии PhotoMath. В данном модуле выполняются все необходимые преобразования для последующего подсчета процентного состава с выдачей готового результата пользователю, а также сохранение в базе данных.

В качестве входных данных программного модуля выступают фотографии микроструктуры покрытия, полученные при помощи микротвердомера ПМТ-3М. Для обработки этих данных используется методологический аппарат компьютерного зрения, в частности сегментация - процесс разделения цифрового изображения на несколько сегментов (множеств пикселей, также называемых суперпикселями). Цель сегментации заключается в упрощении и/или изменении представления изображения, чтобы его было проще и легче анализировать. Сегментация изображений используется для того, чтобы выделить объекты и границы (линии, кривые и т. д.) на изображениях. Более точно, сегментация изображений - это процесс присвоения таких меток каждому пикселю изображения, что пиксели с одинаковыми метками имеют общие визуальные характеристики. Один из основных и простых способов - построение сегментации с помощью порога. Порог - это признак (свойство, в нашем случае - цвет выбранной компоненты), который делит изображение на классы. Операция порогового разделения, которая в результате дает бинарное изображение, называется бинаризацией. Функция бинаризации представлена на рис. 1.

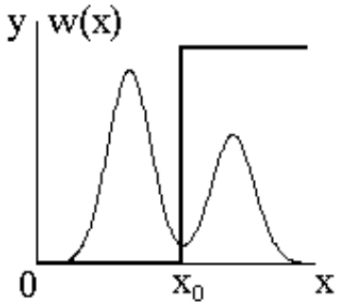


Рис. 1. Функция бинаризации

При бинаризации изображения яркость каждого пикселя $B(x,y)$ сравнивается с пороговым значением яркости $B_T(x,y)$. Если значение яркости пикселя выше значения яркости порога, то на бинарном изображении соответствующий пиксель будет

белым. В противном случае он будет черным.

Необходимость устранения большого числа ошибок процесса бинаризации повлекла за собой появление большого числа методов бинаризации, которые делятся на две группы по принципу построения пороговой поверхности: методы глобальной и локальной бинаризации [6-8].

Пороговой поверхностью является матрица размерностью $M \times N$, соответствующей размерности исходного изображения. Каждая ячейка матрицы задает порог яркости бинаризации для соответствующего пикселя на исходном изображении.

В методах глобальной бинаризации пороговая поверхность является плоскостью с постоянным значением пороговой яркости, а в методах локальной бинаризации значение пороговой яркости меняется от точки к точке изображения и рассчитывается на основе некоторых локальных признаков в окрестности пикселя.

Пороговая обработка изображения может проводиться разными способами.

1. Бинаризация с нижним порогом. Это наиболее простая операция, в которой используется только одно значение порога:

$$f'(m,n) = \begin{cases} 0, & f(m,n) \geq t; \\ 1, & f(m,n) < t. \end{cases}$$

Все значения меньше критерия становятся 1 (в данном случае 255 (белый)), все значения (амплитуды) пикселей больше порога t − 0 (черный).

2. Бинаризация с верхним порогом. Иногда можно использовать вариант первого метода, который дает негатив изображения, полученного в процессе бинаризации. При этом

$$f'(m,n) = \begin{cases} 0, & f(m,n) \leq t; \\ 1, & f(m,n) > t. \end{cases}$$

3. Бинаризация с двойным ограничением. Для выделения областей, в которых значения яркости пикселей могут меняться в известном диапазоне, вводится бинаризация с двойным ограничением ($t_1 < t_2$):

$$f'(m,n) = \begin{cases} 0, & f(m,n) \geq t_1; \\ 1, & t_1 < f(m,n) \leq t_2; \\ 0, & f(m,n) \geq t_2. \end{cases}$$

4. Неполная пороговая обработка. Данное преобразование дает изображение, которое может быть проще для дальнейшего анализа, поскольку оно становится лишенным фона со всеми деталями, присутствующими на исходном изображении.

Также возможны другие вариации с порогами, где пропускается только часть данных (среднеполосовой фильтр), когда выбранная компонента имеет промежуточный цвет, отличный от фона и цвета других компонент.

В настоящей программе используется пороговая бинаризация с предварительной обработкой полученного изображения, что дополнительно повышает различимость исследуемой компоненты. Последовательность выполнения данной операции выглядит следующим образом:

- перевод цветового пространства RGB в оттенки серого (с максимальной разностью между цветовыми компонентами):

Gray = Round((Max(R,G,B)+ Min (R,G,B))/2);

- расширение динамического диапазона оттенков серого (L_{min}, L_{max}) до максимального (0, 255) для повышения контраста между оттенками серого (эквализация гистограммы):

Gray = Round(255(Gray- L_{min})/(L_{max} - L_{min}));

- прохождение по изображению медианного фильтра для исключения мелких дефектов (точки пыли, царапины) и сглаживания исходного изображения;
- применение фильтра Гаусса (с целью снижения уровня цифрового шума преобразования при фотографировании и повышения локальной контрастности) для обработки серого изображения с последующим вычитанием исходного.

Программа PhotoMath-2 представляет собой оконное приложение Windows, которое предназначено для определения процентного состава компонентов в нитрид-титановых покрытиях. Программа

разработана в интегрированной среде разработки Borland Delphi 7 (рис. 2).

Программа PhotoMath может работать в двух режимах: автоматическом и ручном. В ручном режиме осуществляется последовательное прохождение всех этапов действия программы и определение необходимых параметров (так называемое первичное обучение). Автоматический режим предназначен для выполнения всех этапов с заранее определенными (в ручном режиме) параметрами; при этом происходит поиск всех файлов в директории Photo-In и сохранение результатов в файл MemoLog_Date.

Для упрощения работы программы и исключения ложных срабатываний алгоритма определения рабочей площади кадра (ввиду неравномерности засветки, геометрических аберраций (искажений) оптической системы и пр.) принимается допущение, что искомая область - круг с радиусом R. Тогда

$$\text{Count_Field} = \pi R^2,$$

где Count_Field - требуемое значение рабочей площади кадра (единица измерения Count_Field - пиксель в квадрате).

Для нахождения заданных объектов (Ti-компонент, пор, дефектов) используется метод подсчета элементов битовой матрицы изображения, имеющих значение яркости больше предварительно установленного заданного значения порога бинаризации, что соответствует черному цвету.

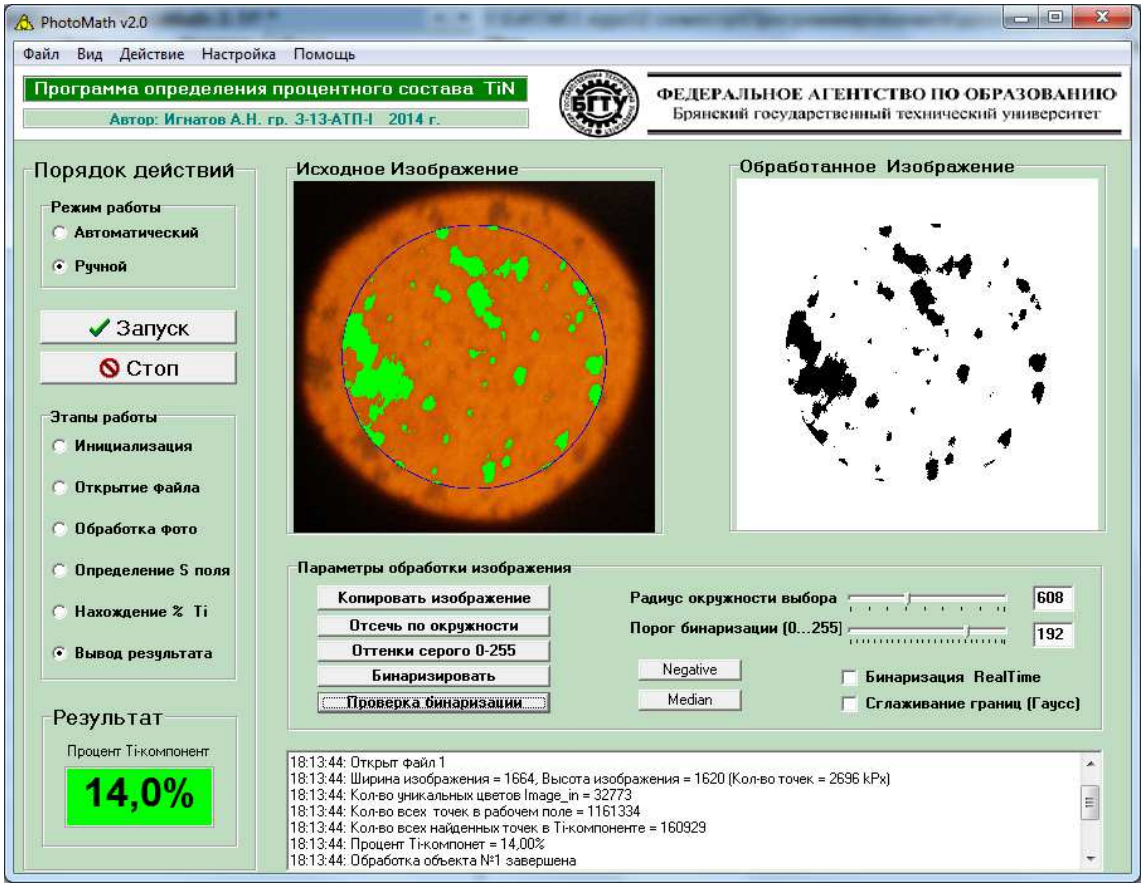


Рис. 2. Основное окно программы

Таким образом, задача подсчета Ti-компонент сводится к подсчету количества черных точек на изображении Image_out (объект Canvas). Их число обозначается Count_Ti.

Искомое значение процентного состава компонентов в нитрид-титановых покрытиях определяется по формуле

$$Ti = \frac{\text{Count_Ti}}{\text{Count_Field}} 100\%.$$

Для визуальной проверки правильности подбора порога бинаризации, а также для общей оценки корректности работы программы используется кнопка «Проверка бинаризации». При этом на исходном изображении Ti-компоненты, найденные по заданным параметрам бинаризации, подсвечиваются зеленым цветом.

Особенности программы PhotoMath:

- Все настройки программы сохраняются в ini-файле. Они служат для использования предустановленных параметров обработки, определенных в ручном режиме, при автоматическом режиме работы программы.
- Каждое действие пользователя записывается в log-файл и служит для анализа результатов работы алгоритмов программы.
- Проверка верности распознавания путем наложения полученного разделения компонент на исходное изображение и визуального контроля.

Данное программное средство можно использовать для определения числового отношения каких-либо компонент в любом объекте исследования. Например, аналогичная программа может быть разработана для контроля геометрических размеров и сортировки выпускаемой продукции.

Таким образом, при разработке программного модуля:

- Решена задача по автоматизации деятельности сотрудника лаборатории, в которой реализованы все функции, описанные в постановке задачи.
- Разработаны и применены комбинированные методы обработки изображения с учетом свойств реального объекта исследования.
- Проведены испытания программного продукта.
- Установлено, что имеется возможность полной автоматизации эксперимента (управление фотоаппаратом, передача данных и их обработка в автоматическом режиме с выдачей результата в базу данных, построение графиков).

Созданная автоматизированная система определения процентного состава износостойких покрытий позволяет сократить трудо- и времязатраты сотрудника лаборатории, занимающегося исследованием микроструктуры покрытий. Проанализировав полученные результаты и рассмотрев альтернативные методы решения задачи, можно определить пути дальнейшей модернизации данного программного модуля:

1. Использование специализированных программных продуктов, таких как LabView, Matlab и др.
2. Создание аналогичного программного продукта с применением библиотеки компьютерного зрения с открытым исходным кодом - OpenCV.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матлахов, В.П. Нанесение износостойких покрытий на инструмент методом КИБ/ В.П. Матлахов, Ю.В. Дарковский //СТИН.- 2006. - №12. - С. 17-20.
2. Матлахов, В.П. Обеспечение износостойкости цилиндрических поверхностей трения упрочнением / В.П. Матлахов//Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение, 2007. – №5(29). – С. 41-46.
3. Горленко, А.О. Технологическое повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения / А.О. Горленко, В.П. Матлахов // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2010.- №5.- С. 20-26 .
4. Горленко, А.О. Моделирование контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей трения / А.О. Горленко, В.П. Матлахов // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2007.- №8.- С. 1-9 .
5. Матлахов, В.П. Повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения на основе сочетания методов нанесения нитрид-титановых покрытий и электромеханической обработки/ В.П. Матлахов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008.- №2.- С. 32-38.
6. Яншин, В.В. Обработка изображений на языке СИ для IBM PC: Алгоритмы и программы/ В.В. Яншин, Г.А. Калинин. – М.: Мир, 1994. – 320 с.
7. Ярославский, Л.П. Введение в цифровую обработку изображений/ Л.П. Ярославский.- М.: Мир, 1992. – 344 с.
8. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений/ У. Прэтт. – М.: Наука, 2000. – 1024 с.

1. Matlakhov, V.P. Wear-resistant Coating on Tools by KIB Method/ V.P. Matlakhov, Yu.V. Darkovsky //STIN.- 2006. - №12. - pp. 17-20.
2. Matlakhov, V.P. Assurance of wear-resistance in friction cylindrical surfaces by strengthening / V.P. Matlakhov//Strengthening Technologies and Coatings. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – №5(29). – pp. 41-46.
3. Gorlenko, A.O. Wear-resistance increase in friction cylindrical surfaces / A.O. Gorlenko, V.P. Matlakhov // Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms. - 2010.- №5.- pp. 20-26 .
4. Gorlenko, A.O. Simulation of contact interaction and wear of friction cylindrical surfaces / A.O. Gorlenko, V.P. Matlakhov // Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms. - 2007.- №8.- pp. 1-9 .
5. Matlakhov, V.P. Wear-resistance increase in friction cylindrical surfaces based on combination of nitride-titanium coating and electro-machining/ V.P. Matlakhov // Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2008.- №2.-pp. 32-38.
6. Yanshin, V.V. Image Processing in C language for IBM PC: Algorithms and Programs/ V.V. Yanshin, G.A. Kalinin. – M.: World, 1994. – pp. 320.
7. Yaroslavsky, L.P. Introduction in Digital Image Processing/ L.P. Yaroslavsky.- M.: World, 1992. – pp. 344.
8. Pratt, W. Digital Image Processing/ W. Pratt. – M.: Science, 2000. – pp. 1024.

Статья поступила в редколлегию 14.03.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Горленко А.О.

Сведения об авторах:

Матлахов Виталий Павлович, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированные технологические системы» Брянского государственного технического университета, e-mail: atsys@tu-bryansk.ru.
Игнатов Александр Николаевич, инженер-электроник, БРУ АО «Транснефть-Дружба», отдел АСУ ТП, e-mail: ai-80@bk.ru.
Суслов Анатолий Григорьевич, д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, тел.: (4832) 51-19-97.

Matlakhov Vitaly Pavlovich, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Automated Technological Systems” Bryansk State Technical University, e-mail: atsys@tu-bryansk.ru.
Ignatov Alexander Nikolayevich, Electronic-engineer, BRD of "Transoil “Friendship” Co, Dep. AMS TP, e-mail: ai-80@bk.ru.
Suslov Anatoly Grigorievich, D.Eng., Prof. of Bauman State Technical University of Moscow, Phone: (4832) 51-19-97.

УДК 621.787.6.004
DOI: 10.12737/20244

А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, Д.Е. Тарасов

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КОМБИНИРОВАННОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ

Описан способ комбинированного упрочнения металлических деталей машин, заключающийся в предварительном деформационном упрочнении ударными волнами и последующей цементации, в результате чего формируется упрочненный поверхностный слой, обладающий одновременно высокой твердостью и запасом пластичности.

Ключевые слова: долговечность, упрочнение, волна деформации, цементация, твердость, пластичность, поверхностный слой.

A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov, D.E. Tarasov

MACHINERY LIFE INCREASE BY COMBINED STRENGTHENING

The reason of failure of many machine parts is contact fatigue. To increase contact-fatigue wear resistance it is necessary to create a surface layer possessing increased stress-strain properties which are formed by strengthening. The most effective methods of strengthening are those creating a surface layer with simultaneous high hardness and large reserve of plasticity. One of such methods is combined strengthening at which a surface to be strengthened is affected preliminarily by deformation shock waves forming a deep work-hardened layer and then its case hardening is carried out. As a result of this process a strengthened surface layer is formed which consists of hard uniformly strengthened carburized layer and a softer heterogeneously strengthened sublayer alternating hard and soft areas depending on strengthening modes with shock waves. The operational researches of samples obtained by the offered combined strengthening have shown high efficiency of the method for life increase under conditions of contact cyclic loads which can increase considerably a range of machine parts to be strengthened.

Key words: longevity (life), strengthening, strain wave, case-hardening, hardness, plasticity, surface layer.

Введение

Долговечность большого количества деталей машин связана с повышением их выносливости к действию контактных циклических нагрузок. При изнашивании на рабочих поверхностях этих деталей возникают выкрашивания, которые приводят к повышенным вибрациям и шуму, а в дальнейшем к поломке детали и всего механизма. Для увеличения сопротивления поверхностного слоя деталей действию контактных циклических нагрузок необходимо использование упрочняющей обработки, обеспечивающей его высокую твердость. Однако повышение твердости при контактных нагрузках увеличивает риск хрупкого разрушения, поэтому одновременно с высокой твердостью упрочненный поверхностный слой должен обладать определенным запасом пластичности.

Одним из решений данной проблемы является создание в поверхностном слое гетерогенно упрочненной структуры с определенным распределением твердых и мягких (вязко-пластичных) участков. Ее преимуществом является то, что при действии циклических контактных нагрузок происходит торможение вязким и пластичным материалом хрупкой трещины, зародившейся в твердой структурной составляющей. Кроме того, глубина упрочненного поверхностного слоя должна исключать его деформацию и продавливание, т.е. напрямую зависит от испытываемых деталью контактных нагрузок. Поэтому для тяжелонагруженных деталей необходим достаточно глубокий упрочненный слой, достигающий 5-6 мм и более.

В настоящее время не существует универсальных технологий, позволяющих одинаково эффективно обеспечивать упрочнение материала в широком диапазоне глубин поверхностного слоя (от несколь-

ких микрометров до 6-8 мм). В связи с этим целесообразно применение комбинированных, взаимно сочетаемых и дополняющих друг друга технологий, имеющих различную физическую природу упрочнения и в совокупности обеспечивающих заданную эпюру изменения свойств градиентного поверхностного слоя.

Для повышения контактной выносливости хорошо зарекомендовало себя упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД), которое создает наклепанный поверхностный слой с высокой твердостью (до 6500 МПа) и сжимающими остаточными напряжениями, благоприятно влияющими при действии циклических нагрузок. Упрочненный поверхностный слой после ППД имеет плавный переход к неупрочненному металлу, что исключает появление концентраторов напряжений на границах и, соответственно, возникновение усталостных трещин. Кроме того, преимуществами использования ППД являются возможность обработки деталей любых размеров и конфигураций, возможность местного упрочнения участка детали, технологичность, простота осуществления, возможность механизации и автоматизации процесса.

Поверхностное пластическое деформирование позволяет полнее реализовать потенциальные возможности других технологий, поэтому широко применяется в комбинированном упрочнении. Достаточно перспективным является комбинированное упрочнение ППД с последующей химико-термической обработкой, в частности цементацией. Объясняя физику этого процесса, можно отметить, что образующиеся в процессе насыщения поверхности углеродом структурные элементы, их количество и характер расположения будут зависеть и от исходного структурного состояния поверхностного слоя, а точнее от энергетического состояния атомов, которое существенно меняется в результате обработки ППД. Использование ППД перед цементацией интенсифицирует диффузионные процессы и позволяет достигнуть более высоких значений концентрации углерода в диффузионной зоне. Появляется возможность сокращения времени и энергетических затрат, связанных с процессом науглероживания. Поверхностный слой, упрочненный комбинированной обработкой ППД и цементацией, может иметь дополнительные ресурсы для повышения эксплуатационных характеристик детали.

Обсуждение результатов исследований

На основании анализа исследований комбинированного упрочнения ППД и цементацией установлено, что наибольший эффект достигается при сочетаниях режимов, обеспечивающих примерно равную толщину упрочненного ППД и диффузионного, полученного при цементации, слоев [1]. Широко используемые способы ППД (обкатывание, выглаживание, дробеструйная обработка) не всегда позволяют создавать упрочненный слой глубиной не меньше, чем цементация. Кроме того, перечисленными способами сложно регулировать равномерность упрочнения, которая, как указывалось выше, оказывает достаточно большое влияние на долговечность деталей при действии контактных циклических нагрузок.

Предлагаемый авторами способ ППД – статико-импульсная обработка (СИО) - позволяет воздействовать на упрочняемый материал ударными волнами, формируя деформированные участки на большой глубине, что дает более широкие возможности при регулировании свойств упрочненного поверхностного слоя [2-5]. Для генерирования ударных волн используется ударная система «боек – волновод». Ударные волны характеризуются законом изменения сил во времени, а период такой волны называют ударным импульсом. Эти характеристики зависят от геометрических параметров соударяющихся бойка и волновода, свойств их материалов и скорости соударения. Особенностью способа является то, что форма ударных импульсов максимально адаптирована к упрочняемому материалу и условиям нагружения, что позволяет более эффективно использовать кинетическую энергию ударов. Статиче-

ская составляющая нагрузки предназначена для наиболее полного использования импульсной.

Под действием ударных импульсов на поверхности формируются пластические отпечатки, форма и размеры которых, в соответствии с заданной кратностью, определяют глубину, степень и равномерность упрочнения поверхностного слоя, шероховатость поверхности. Глубина упрочненного поверхностного слоя, полученного в результате воздействия ударными волнами деформации, может достигать 6-8 мм и более, твердость – до 6500 МПа.

Технология СИО позволяет достаточно точно регулировать равномерность упрочнения, создавая как равномерно, так и гетерогенно упрочненную структуру [6-10]. Регулирование равномерности достигается за счет перекрытия пластических отпечатков, полученных в результате действия на материал ударных импульсов, которое оценивается через коэффициент перекрытия

$$K = 1 - \frac{S}{\delta f 60},$$

где δ – размер отпечатка, мм; S – скорость подачи заготовки относительно инструмента, мм/мин; f – частота ударов, Гц.

Если $K = 0$, то край одного отпечатка граничит с краем другого; если $0 < K < 1$, то отпечатки перекрываются; при $K = 1$ происходит многократное вдавливание инструмента в одно и то же место.

Проведены экспериментальные исследования по созданию упрочненного поверхностного слоя комбинированной обработкой волнами деформации и цементацией. Технологический цикл комбинированной обработки состоял из следующих операций: предварительной механической обработки, упрочнения волной деформации, цементации, финишной механической обработки.

В качестве образцов для исследований были выбраны пластины из легированных низкоуглеродистых цементуемых сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А, которые используются для изготовления ответственных тяжелонагруженных деталей машин (шестерни, червяки, шлицевые валы, элементы подшипников качения, втулки, кулачковые муфты, направляющие, шкворни, пальцы, валики и т.д.), работающих под действием контактных циклических нагрузок. К таким деталям предъявляются требования высокой поверхностной твердости, а также прочности, пластичности и вязкости сердцевины.

Нагружение волной деформации осуществлялось с энергией $A = 25$ Дж. В качестве инструментов использовались стержневые ролики диаметром 10 мм и шириной $b_р = 5…7$ мм. Соответственно удельная энергия ударных импульсов ($a = A / b_р$) составляла 3,57…5 Дж/мм. Коэффициент перекрытия пластических отпечатков изменялся от 0,2 до 0,6.

Процесс газовой цементации выполнялся в механизированной камерной безмуфельной печи со встроенными закалочными баками. Значения температур процесса: цементации – 930°С; подстуживания – 550°С; печи повторного нагрева – 840°С; закалочного масла МС-20 – 150°С; моечного раствора – 80°С; отпускной печи – 180°С. Продолжительность процесса (время диффузии) - 8 часов. Поверхностная твердость, измеренная на образцах-свидетелях для выбранных заготовок из сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А, составила 57 HRC. Глубина цементованного слоя составила 2 и 3 мм для образцов из сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А соответственно. Следовательно, средняя скорость цементации при использовании предварительного упрочнения ударными волнами достигала 0,25…0,3 мм/ч, тогда как для сталей без предварительного ППД обычно составляет около 0,05 мм/ч [1].

Финишная механическая обработка заключалась в шлифовании поверхностей и позволяла удалить неровности от пластических отпечатков, образованные в результате действия волн деформации.

На полученных образцах проведены исследования микротвердости по глубине и вдоль упрочненного поверхностного слоя (рис. 1).

Характер эпюр распределения твердости по глубине и вдоль упрочненной поверхности после комбинированного уп-

рочнения отличается от характера эпюр, полученных после цементации. Верхняя часть упрочненного слоя и в том и в другом случае имеет достаточно равномерную структуру. Твердость вдоль поверхности практически не изменяется, но при этом постепенно уменьшается по глубине.

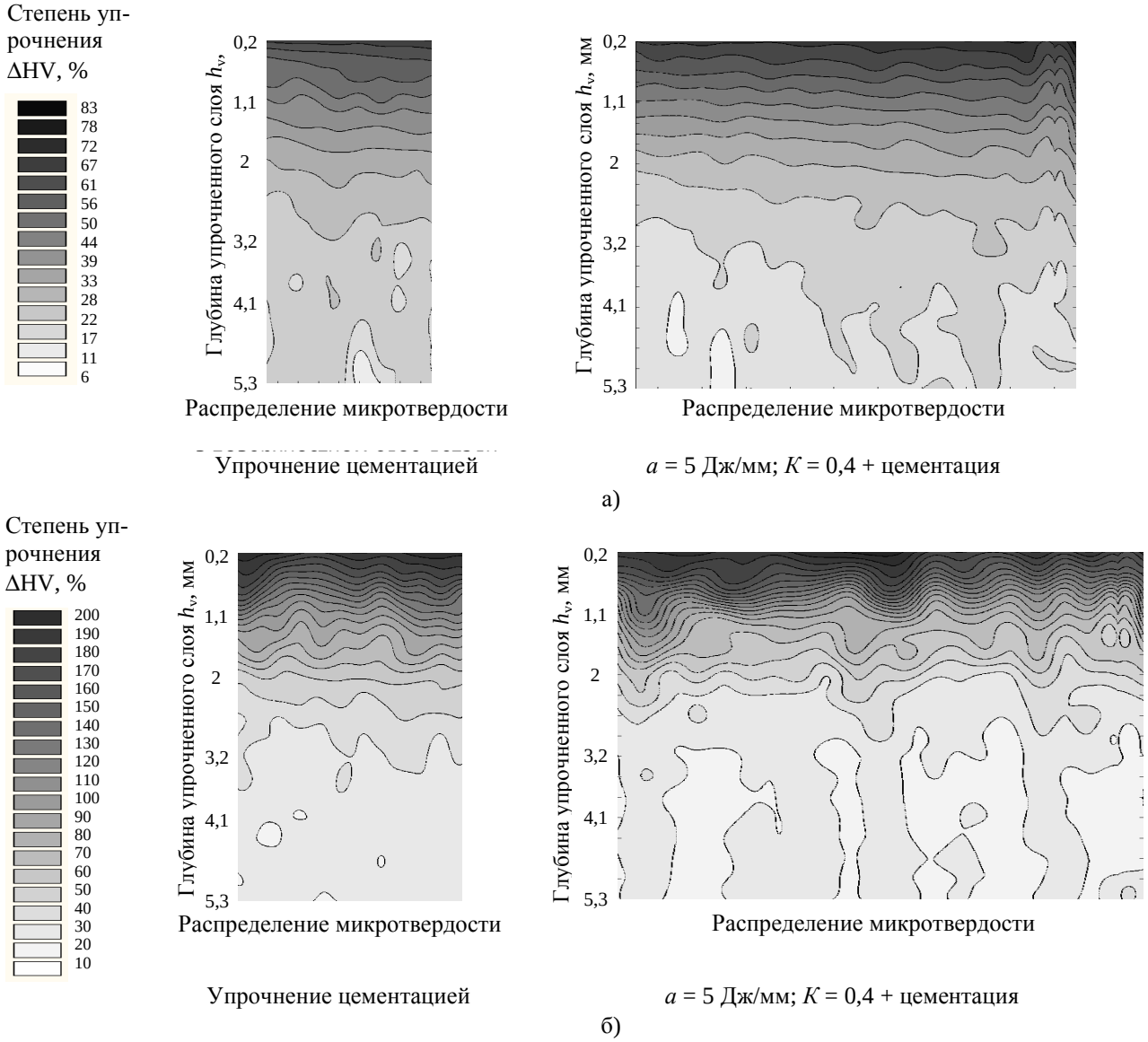


Рис. 1. Изменение степени упрочнения по глубине и вдоль упрочненного слоя, полученного комбинированной обработкой волной деформации и цементацией: а – сталь 20Х2Н4А; б – сталь 18ХГТ

Ниже расположен слой, в котором твердость в большей степени изменяется вдоль поверхности и в меньшей – по глубине, постепенно переходящий в нецементованную сердцевину, т.е. твердый, равномерно упрочненный поверхностный слой «опирается» на более мягкий гетерогенно упрочненный подслой. Таким образом, структура упрочненного слоя после комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией может быть определена как «плита на сваях».

Установлено, что параметры равномерно и гетерогенно упрочненных поверхностных слоев изменяются в зависимости от режимов воздействия волной деформации.

Использование при комбинированном упрочнении предварительного воздействия волной деформации для стали 20Х2Н4А способствовало повышению максимальной степени упрочнения на 25 %, тогда как у стали 18ХГТ увеличения максимальной степени упрочнения за счет

предварительного воздействия волной деформации не наблюдалось. Причем максимальная степень упрочнения увеличилась только при режимах, когда воздействие волной деформации осуществлялось с высоким коэффициентом перекрытия $K = 0{,}6$, т.е. было получено большее количество дефектов кристаллической решетки упрочняемого материала, способствующих лучшему проникновению углерода в поверхностный слой при цементации.

Сформированный гетерогенно упрочненный подслой чередует твердые участки вытянутой формы по глубине упрочнения. С увеличением коэффициента перекрытия пластических отпечатков, полученных при воздействии волной деформации, в диапазоне 0,2…0,6 степень упрочнения твердых и мягких участков увеличивается соответственно в 1,75 и 2,2 раза для стали 20Х2Н4А и в 1,2 и 1,14 раза для стали 18ХГТ, а ширина твердых участков (измеряемая вдоль упрочняемой поверхности) и расстояние между ними уменьшаются. С увеличением удельной энергии ударных волн от 3,57 до 5 Дж/мм высота вытянутых по глубине упрочнения твердых участков увеличивается до 3 раз, степень упрочнения твердых и мягких участков повышается соответственно в 1,4 и 1,6 раза (в большей степени для стали 20Х2Н4А).

Проведены исследования долговечности упрочненных образцов при действии контактных циклических нагрузок.

Для оценки долговечности образцов после упрочнения был принят параметр – сопротивление контактному выкрашиванию, позволяющее сравнить величину выкрашиваний на поверхности, упрочненной комбинированной обработкой, относительно поверхности, упрочненной только цементацией:

$$\Delta I = \frac{S_д}{S_{д0}} \frac{\sum S_0}{\sum S},$$

где $\sum S$ и $\sum S_0$ – суммарная площадь выкрашиваний соответственно на участке, упрочненном комбинированной обработкой и цементацией, мм^2; $S_д$ и $S_{д0}$ – площадь дорожки катания контртел (шаров) соответственно на участке, упрочненном комбинированной обработкой и цементацией, мм^2.

Таким образом, величина ΔI характеризует повышение долговечности поверхностного слоя от предварительного воздействия (перед цементацией) волной деформации.

Анализ результатов проведенных испытаний показал, что при упрочнении стали 20Х2Н4А в исследуемом диапазоне режимов предварительное воздействие волной деформации позволяет повысить долговечность в 1,3…2,5 раза ($\Delta I = 1{,}3…2{,}5$), при упрочнении стали 18ХГТ – в 0,8…1,5 раза (рис. 2). Максимальная величина ΔI получена для стали 20Х2Н4А при упрочнении с $K = 0{,}4$ и $a = 5$ Дж/мм, а для стали 18ХГТ – при $K = 0{,}4$ и $a = 4{,}17$ Дж/мм. Минимальное значение ΔI получено для стали 20Х2Н4А при упрочнении с $K = 0{,}4$ и $a = 4{,}17$ Дж/мм, а для стали 18ХГТ – при $K = 0{,}2$ и $a = 5$ Дж/мм.

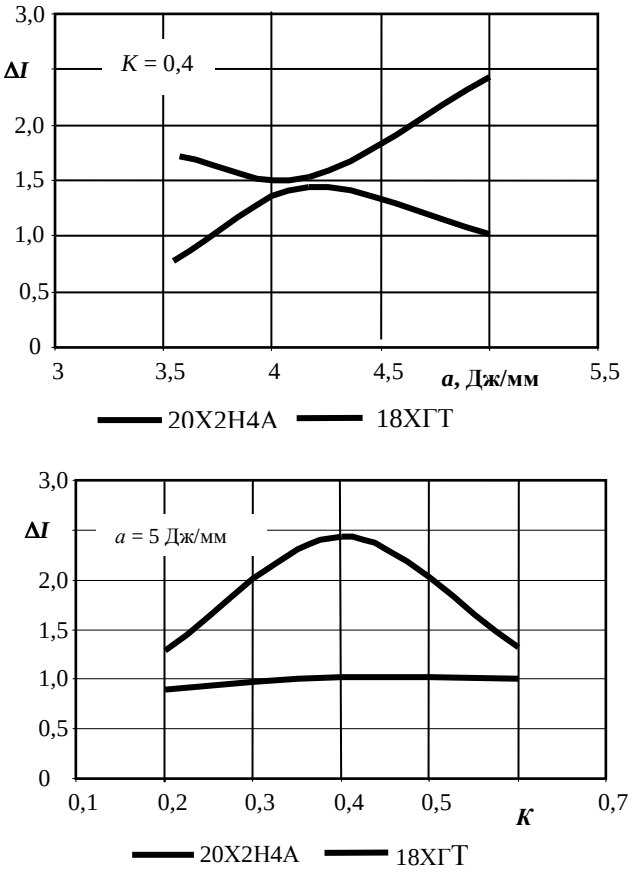


Рис. 2. Зависимость сопротивления контактному выкрашиванию от параметров упрочнения волной деформации: удельной энергии ударных импульсов a и коэффициента перекрытия пластических отпечатков K

Заключение

Установлена возможность осуществления процесса комбинированного упрочнения, который заключается в предварительном воздействии на материал волнами деформации и его последующей цементации. Упрочнение волной деформации, в отличие от известных способов поверхностного пластического деформирования, способствует созданию упрочненного поверхностного слоя с большой глубиной (до 5-8 мм) и упорядоченным чередованием твердых и мягких (вязко-пластичных) областей и, соответственно, новым эксплуатационным возможностям упрочненного материала. При комбинированном упрочнении формируются равномерно упрочненный верхний слой и гетерогенно упрочненный подслой, параметры которых (соотношение их твердости и толщины, а также чередование твердых и мягких участков полученной гетерогенной структуры) определяют долговечность упрочненного материала.

Установлено, что применение перед цементацией предварительного воздействия на упрочняемую поверхность волнами деформации позволяет повысить ее долговечность при действии контактных циклических нагрузок до 2,5 раза.

Применение предварительного упрочнения ударными волнами деформации позволило сократить время и энергетические затраты, связанные с процессом науглероживания, и ускорить процесс цементации до 6 раз. Это особенно важно при получении глубоких (до 5 мм и более) науглероженных слоев.

Исследования проводились при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-08-00112.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев, В.Н. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки / В.Н. Беляев, В.П. Иванов, А.Р. Ингеманссон, А.Н. Исаев, А.В. Киричек [и др.]. – М.: Спектр, 2014. – 403 с.
2. Лазуткин, А.Г. Механика нагружения поверхности волной деформации / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Ю.С. Степанов, Д.Л. Соловьев. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 149 с.
3. Kirichek, A.V. The methods of dynamic surface strengthening by plastic deformation / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev // Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem). – 2001. – Is. 7. – P. 28-32.
4. Kirichek, A.V. Deformation Wave Hardening of Metallic Materials / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, A.Yu Altuhov // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2014. – Vol. 6 (3).
5. Kirichek, A.V. Influence of regimes of static-pulse processing on uniformity of superficial layer hardening /A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev, S.A. Silant'ev // Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem). – 2004. – Is. 2. – P. 13-17.
6. Kirichek, A.V. Properties and Technology for Quasi-Composite Blanket Using Natural Reinforcement of the Metal by Strain Affected Areas / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2013. – Vol. 5 (4).
7. Киричек, А.В. Создание гетерогенной структуры материала статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // СТИН. – 2007. – №12. – С. 28-31.
8. Kirichek, A.V. Creating heterogeneous surface structures by static-pulsed treatment / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev // Russian Engineering Research. – 2008. – Vol. 28 (3). – P. 277-279.
9. Kirichek, A.V. Nanostructure Changes in Iron-Carbon Alloys as a Result of Impulse Deformation Wave Action / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2013. – Vol. 5 (4).
10. Kirichek, A.V. Production of Quasicomposite Surface Layer of a Metal Material by Shock Wave Strain Hardening / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, A.Yu. Altuhov // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2014. – Vol. 6 (3).

1. Belyaev, V.N. Effective Technologies for Surface Plastic Deformation and Combined Working / V.N. Belyaev, V.P. Ivanov, A.R. Ingemansson, A.N. Isayev, A.V. Kirichek [et al.]. – M.: Spectrum, 2014. – pp. 403.
2. Lazutkin, A.G. Loading Mechanics of Wave Deformation Surface / A.G. Lazutkin, A.V. Kirichek, Yu.S. Stepanov, D.L. Soloviyov. – M.: Mechanical Engineering-1, 2005. – pp. 149.
3. Kirichek, A.V. The methods of dynamic surface strengthening by plastic deformation / A.V. Kiri-

chek, D.L. Solov'ev // Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem). – 2001. – Is. 7. – P. 28-32.
4. Kirichek, A.V. Deformation Wave Hardening of Metallic Materials / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, A.Yu Altuhov // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2014. – Vol. 6 (3). – P. 03.
5. Kirichek, A.V. Influence of regimes of static-pulse processing on uniformity of superficial layer hardening /A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev, S.A. Silant'ev // Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem). – 2004. – Is. 2. – P. 13-17.
6. Kirichek, A.V. Properties and Technology for Quasi-Composite Blanket Using Natural Reinforcement of the Metal by Strain Affected Areas / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2013. – Vol. 5 (4). – P. 04.
7. Kirichek, A.V. Formation of Material Heterogeneous Structure by Static-Pulse Working / A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov // STIN. – 2007. – №12. – pp. 28-31.
1. 8.Kirichek, A.V. Creating heterogeneous surface structures by static-pulsed treatment / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev // Russian Engineering Research. – 2008. – Vol. 28 (3). – P. 277-279.
2. 9.Kirichek, A.V. Nanostructure Changes in Iron-Carbon Alloys as a Result of Impulse Deformation Wave Action / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2013. – Vol. 5 (4). – P. 04.
10. Kirichek, A.V. Production of Quasicomposite Surface Layer of a Metal Material by Shock Wave Strain Hardening / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, A.Yu. Altuhov // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2014. – Vol. 6 (3). – P. 03.

Статья поступила в редколлегию 12.05.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Бишутин С.Г.

Сведения об авторах:

Киричек Андрей Викторович, д.т.н., профессор, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, тел.: (4832)51-51-38, e-mail: avk.57@yandex.ru.
Соловьев Дмитрий Львович, д.т.н., профессор Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета, тел.: (49234) 77-1-44, e-mail: murstin@yandex.ru.
Тарасов Дмитрий Евгеньевич, к.т.н., АО «Ливнынасос», тел.: (48677) 7-76-15, e-mail: tde82@yandex.ru.

Kirichek Andrey Viktorovich, D.Eng., Prof., Pro-Rector for Promising Development Bryansk State Technical University, Phone: (4832)51-51-38, e-mail: avk.57@yandex.ru.
Soloviyov Dmitry Lvovich, D.Eng., Prof., Murom Institute (Branch) of Vladimir State University, Phone: (49234) 77-1-44, e-mail: murstin@yandex.ru.
Tarasov Dmitry Yevgenievich, Can.Eng., “Livny-pump” Co., Phone: (48677) 7-76-15, e-mail: tde82@yandex.ru.

УДК 621.9
DOI: 10.12737/20245

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ

Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин, А.В. Хандожко

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассмотрен один из способов разрешения неопределенности при технологическом обеспечении параметров качества поверхностного слоя деталей машин для заданных условий обработки. Обоснован выбор структуры математических моделей. Описан алгоритм параметрической идентификации предложенных математических моделей.

Ключевые слова: математическая модель, самообучающаяся технологическая система, параметры качества поверхностного слоя, механическая обработка.

D.I. Petreshin, O.N. Fedonin, A.V. Khandozhko

AUTOMATION OF QUALITY PARAMETER CONTROL OF MACHINERY SURFACE LAYER UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

Under conditions of automated production the matter of ensuring the required parameters of surface layer quality in machine parts at machining becomes urgent. To ensure the required quality parameters of a surface layer (QPSL) in machinery at mechanical operation there are used simulators predicting their values depending on working modes. At the ensuring of QPSL in machine parts at mechanical operation occurs uncertainty connected with the absence of univocal simulators predicting QPSL depending on working modes. One of the methods to solve the uncertainties existing consists in the instruction and self-instruction of a technological system during control and application of obtained and accumulated information at adaptive control. And at the same time the problem of parametric identification at the adopted structure of a simulator is solved.

The parametric identification of simulators is carried out by a self-learning technological system of control (STSC). The developed STSC is intended for ensuring the specified parameter of roughness R_a , surface residual stresses, surface micro-hardness and the complex quality parameter of friction surface C_x. The algorithm of system functioning is realized as a software loaded in memory of a control device.

Key words: simulator, self-learning technological system, quality parameters of surface layer, mechanical operation (machining).

Введение

В условиях автоматизированного производства актуальным становится вопрос обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя деталей машин при механической обработке. Для обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя (ПКПС) деталей машин при механической обработке используют математические модели, предсказывающие их значения в зависимости от режимов обработки. В большинстве случаев используют эмпирические модели, которые имеют узкое конкретное применение. Эти модели достаточно точно предсказывают выходные параметры процесса только тогда, когда условия механической обработки детали совпадают с условиями, при которых модель была получена. Эти требования в условиях действующего производства, где неизбежно присутствуют изменение жесткости технологической системы, износ инструмента, разброс припуска и твердости заготовок и другие факторы, достаточно сложно обеспечить. Задача обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя деталей машин существенно осложняется при обработке новых материалов и использовании новых инструментальных материалов, когда справочные данные по ним отсутствуют или не адекватны реальным условиям. Поэтому при обеспечении ПКПС деталей

машин при механической обработке имеется неопределенность, связанная с отсутствием однозначных математических моделей, полученных при данных условиях и предсказывающих параметры качества поверхностного слоя в зависимости от режимов обработки.

Постановка задачи

Одним из способов разрешения имеющейся неопределенности является обучение или самообучение технологической системы в процессе управления и в использовании получаемой и накапливаемой информации при адаптивном управлении. При этом решается задача параметрической идентификации при принятой структуре математической модели.

Математические модели, создаваемые для целей управления, могут и не отражать физическую сущность явления. Им достаточно лишь констатировать наличие определенной формальной связи между управляющим входом и управляемым выходом. Характер и особенности этой связи и составляют основу модели. Поэтому для описания параметров качества поверхностного слоя деталей машин в зависимости от режимов обработки (глубина резания, подача, скорость резания) можно использовать стохастические мультипликативные модели. В качестве математической модели, связывающей параметры качества поверхностного слоя деталей машин и режимы обработки, используется модель вида

$$\Pi = C0t^{x}S^{y}V^{z},$$

где П – параметр качества поверхностного слоя деталей машин, управляемый выходной параметр процесса механической обработки; *t, S, V* – глубина резания, подача и скорость резания соответственно, входные управляющие воздействия процесса механической обработки; *C0, x, y, z* – коэффициенты модели.

Известно, что наибольшее влияние на параметр шероховатости *Ra* оказывают геометрия режущей части инструмента, продольная подача и скорость резания [1]. Если учесть, что во время механической обработки детали геометрию режущей части инструмента изменять невозможно, то в качестве управляющих воздействий для параметра шероховатости *Ra* остаются продольная подача и скорость резания. Поэтому связь между параметром шероховатости *Ra* и величиной продольной подачи *S* и скоростью резания *V* может быть выражена математической моделью вида

$$Ra = C_r S^{xr} V^{yr}, \tag{1}$$

где *xr, yr,* C_r – коэффициенты модели; *S* – подача, мм/об; *V* – скорость резания, м/мин.

Исследования [2] показывают, что на формирование поверхностной микротвердости и остаточных напряжений поверхностного слоя детали значительное влияние оказывают температурное и силовое поля в зоне резания. Их нестабильность во время обработки из-за колебания припуска, твердости материала заготовки, износа инструмента и других факторов приводит к постоянному изменению силового и температурного режимов обработки. Поэтому в качестве математической модели, связывающей физико-механический параметр (*FMP*) и переменные состояния процесса резания *Pz* и *T*, используется математическая модель вида

$$FMP_c = CfPz^{xf}T^{yf}, \tag{2}$$

где *FMP_c* – вычисленное значение физико-механического параметра поверхностного слоя; *Pz* – главная составляющая силы резания, Н; *T* – температура в зоне резания, °С; *Cf, xf, yf* – коэффициенты модели.

Математическая модель (2) применяется для косвенного определения текущего значения физико-механического параметра обработанной поверхности на основе измеренных *Pz* и *T* во время механической обработки при адаптивном управлении.

Для адаптивного управления физико-механическим параметром используется модель, связывающая *FMP* с управляющими переменными *S, V и t* процесса резания, вида

$$FMP_c = CuS^{xu}V^{yu}t^{zu}, \quad (3)$$

где S, V, t – подача, скорость резания и глубина резания соответственно; Cu, xu, yu, zu –коэффициенты модели.

При одновременном обеспечении параметров шероховатости, поверхностной микротвердости и поверхностных касательных остаточных напряжений используется комплексный параметр качества поверхности Cx [1]. Комплексный параметр Cx, применяемый для оценки качества поверхности трения, включает в себя параметры шероховатости, волнистости, макроотклонения и физико-механические параметры поверхностного слоя.

В качестве математической модели, связывающей комплексный параметр Cx и режимы обработки, используется модель вида (3), а для косвенного определения параметра Cx во время механической обработки при адаптивном управлении применяется математическая модель вида (2).

Результаты исследований

Параметрическая идентификация математических моделей (1-3) выполняется разработанной самообучающейся технологической системой управления (СТСУ) (рисунок). Разработанная СТСУ предназначена для обеспечения заданных параметра шероховатости Ra, поверхностных остаточных напряжений, поверхностной микротвердости и комплексного параметра качества поверхности трения Cx.

Алгоритм работы (А) системы реализуется в виде программного обеспечения, записанного в память устройства управления, в качестве которого используется ПЭВМ [5]. Исполнительным устройством системы является технологическая система (ТС), управляемая УЧПУ. Связь ПЭВМ и УЧПУ осуществляется через контроллер сопряжения (КС), подключаемый к ПЭВМ по последовательному интерфейсу RS 232. Управляющими воздействиями U для ТС являются скорость резания V, величина подачи S и глубина резания t. Внешними возмущениями F для ТС являются изменение жесткости технологической системы Δj, износ инструмента hз, разброс припуска Δt и твердости заготовок ΔHB и другие факторы. Для работы СТСУ необходима исходная информация, вводимая оператором (ОП) перед началом работы.

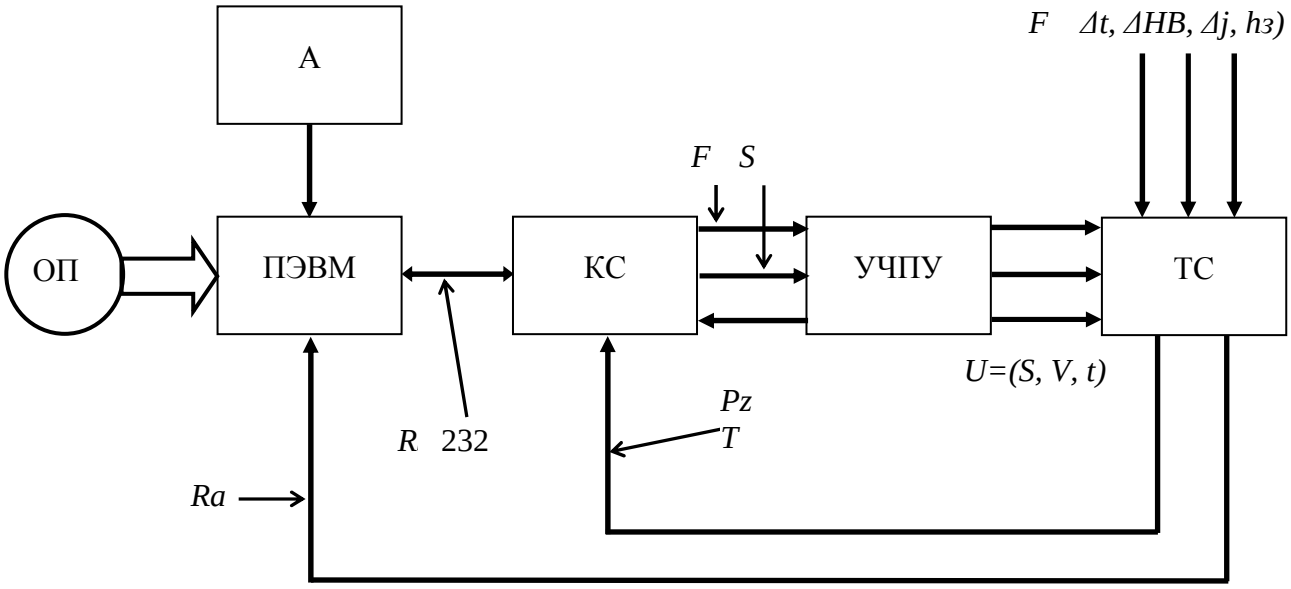


Рис. Структура самообучающейся технологической системы управления

Для определения физико-механических параметров обработанной поверхности используется косвенный метод, основанный на измерении во время обработки силы резания (Pz) и температуры (T) в зоне резания и вычислении по мо-

дели (2) физико-механических параметров качества обработанной поверхности. Сила резания *Pz* и температура *T* измеряются датчиками, установленными непосредственно вблизи зоны обработки. Параметр шероховатости *Ra* обработанной поверхности измеряется прямым методом с использованием лазерного датчика [3].

Алгоритм работы системы описывает следующие основные режимы работы системы: «Ввод и анализ исходных данных»; «Работа с базой данных»; «Самообучение»; «Работа».

Режим «Ввод и анализ исходных данных» предназначен для ввода и анализа исходных данных перед началом обработки. К исходным данным относятся: материал обрабатываемых деталей, геометрия инструмента, режимы резания, диаметр обрабатываемой заготовки, значение обеспечиваемого параметра качества обработанной поверхности. По введенным данным система устанавливает, имеется ли в базе данных соответствующая им математическая модель.

Режим «Работа с базой данных» служит для сохранения и накопления информации об обработанных материалах, условиях обработки и соответствующих им полученных математических моделях. Таким образом, для каждого обрабатываемого материала и каждого из условий обработки в базе данных имеется своя математическая модель. Если соответствующей математической модели нет, то система автоматически переходит в режим «Самообучение».

Задачей режима «Самообучение» является постановка эксперимента и получение математической модели. Для этого на станке обрабатывается пробная деталь – образец. Причем инструмент, его геометрия, материал образца и глубина резания должны быть такие же, как и при обработке последующей партии деталей. Образец разбивается на участки, затем каждый из них автоматически обрабатывается с заданными режимами резания. Контроль параметра качества обработанной поверхности осуществляется системой автоматически в процессе обработки. Данные о входных и выходных параметрах процесса резания автоматически заносятся в ЭВМ, после чего выполняется их статистическая обработка. В результате получается одна из математических моделей (1-3).

Полученная математическая модель и ее данные, т.е. условия обработки, при которых она была получена, и коэффициенты модели, запоминаются в базе данных и используются в дальнейшем. При изменении инструмента, его геометрии, материала деталей, глубины резания и т.п. необходимо будет опять провести обучение системы.

Программное обеспечение системы позволяет автоматически составлять управляющую программу для УЧПУ для режима «Самообучение». Поэтому для составления управляющей программы достаточно ввести размеры одного участка поверхности обрабатываемого образца (длина и диаметр участка). Полученная программа для УЧПУ сохраняется в отдельный текстовый файл (имеет имя «*SAU*»), а затем записывается в УЧПУ.

В режиме «Работа» выполняется обработка партии деталей с адаптивным управлением технологической системой по заданному параметру качества обработанной поверхности. В этом режиме осуществляется прием измерительной информации от датчиков и анализ полученной информации, на основе которого принимается решение об управлении технологической системой.

Заключение

В ходе проведения технологических исследований по самообучению ТС были получены адекватные математические модели [4], используемые впоследствии при адаптивном управлении параметрами качества поверхностного слоя деталей машин. Очевидно, что применение СТСУ позволяет разрешить неопределенность в технологическом обеспечении параметров качества поверхностного слоя деталей машин, связанную с отсутствием математических моделей для заданных условий обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инженерия поверхности деталей/ кол. авт.; под ред. А.Г. Суслова. - М.: Машиностроение, 2008. – 230 с.
2. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей / В.Ф. Безъязычный, В.Н. Крылов, В.А. Полетаев [и др.]; под ред. В.Ф. Безъязычного и В.Н. Крылова. – М.: Машиностроение, 2005. – Ч.1. - 560 с.
3. Петрешин, Д.И. Применение лазерного оптического датчика для измерения высотных параметров шероховатости поверхности деталей машин в самообучающейся адаптивной технологической системе / Д.И. Петрешин // Контроль. Диагностика. – 2009. - № 11. - С. 53 – 57.
4. Суслов, А.Г. Автоматизированное обеспечение комплексного параметра качества поверхностного слоя Сх при механической обработке/ А.Г. Суслов, Д.И. Петрешин // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2011. - № 2. - С. 34-39.
5. Петрешин, Д.И. Разработка алгоритма функционирования автоматизированной системы сбора и анализа данных с металлорежущих станков с ЧПУ/ Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин, В.А. Карпушкин/ Вестник Брянского государственного технического университета. - 2014. - № 1 (41). - С. 58-62.

1. Surface Engineering of Parts/ author group; under the editorship of A.G. Suslov. - M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 230.
2. Automation of Technology for Gas Turbine Aviation Engine Production / V.F. Bezyazychny, V.N. Krylov, V.A. Poletaiev[et al.]; under the editorship of V.F. Bezyazychny and V.N. Krylov. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – Part.1. – pp. 560.
3. Petreshin, D.I. Application of laser optical sensor for measuring of surface roughness height in machinery in self-learning adaptive technological system / D.I. Petreshin // Control. Diagnostics. – 2009. - № 11. - pp. 53 – 57.
4. Suslov, A.G. Automated ensuring of complex quality parameter of surface layer C_x at machining / A.G. Suslov, D.I. Petreshin // High Technologies in Mechanical Engineering. – 2011. - № 2. - pp. 34-39.
5. Petreshin, D.I. Development of Algorithm for Functioning of Automated System of Data Collection and Analysis from NC Machine-Tools/ D.I. Petreshin, O.N. Fedonin, V.A. Karpushkin/ Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2014. - № 1 (41). - pp. 58-62.

Статья поступила в редколлегию 15.05.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Бишутин С.Г.

Сведения об авторах:

Петрешин Дмитрий Иванович, д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные технологические системы» Брянского государственного технического университета, e-mail: dipetreshin@yandex.ru.
Федонин Олег Николаевич, д.т.н., профессор, ректор Брянского государственного технического университета, e-mail: rector@tu-bryansk.ru.
Хандожко Александр Владимирович, д.т.н., заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, e-mail: msi@tu-bryansk.ru.

Petreshin Dmitry Ivanovich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Automated Technological Systems” Bryansk State Technical University, e-mail: dipetreshin@yandex.ru.
Fedonin Oleg Nikolayevich, D.Eng., Prof., Rector of Bryansk State Technical University, e-mail: rector@tu-bryansk.ru.
Khandozhko Alexander Vladimirovich, D.Eng., Head of the Dep. “Machine-tools and Tools” Bryansk State Technical University, e-mail: msi@tu-bryansk.ru.

УДК 621.438
DOI: 10.12737/20246

А.М. Дроконов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ С СУДОВЫМ ГАЗОТУРБИННЫМ ПРИВОДОМ

Приведены результаты исследования вибрационных характеристик газотурбинных установок.

Ключевые слова: вибрация, газоперекачивающие агрегаты, судовой газотурбинный привод, турбомашина, подшипник, виброскорость, виброперемещение.

A.M. Drokonov

VIBRATION INVESTIGATIONS OF GAS-COMPRESSOR UNITS WITH MARINE GAS TURBINE DRIVE

The operation reliability of power units is defined to a great extent by their vibration state, where a basic source of exciting effects is shafting.

For the thorough analysis of a vibration state of turbine units the special vibroacoustic investigations are necessary in the course of which there are must be defined: characters of vibration processes, increased vibration reasons, phenomena promoting the intensification of vibration processes in power units.

With the purpose of systematization and accumulation of such materials there were carried out investigations of vibro-activity of gas-compressor units (GCU) with marine gas turbine drive and working at compressor plants of gas-main pipelines. The plant of GPA-16MG90 type with the power of 16MWt was an object of investigations, where a marine convertible DG-90 manufactured by production company “Zarya” was used as a drive for a natural gas supercharger of 370-18-1 NZL type.

The results of measuring indicate the necessity for taking measures to eliminate an increase vibration of a supporting – thrust bearing of the supercharger and gas turbine engine of DG type.

Key words: vibration, gas-compressor units, marine gas turbine drive, turbo-machine, bearing, vibro-velocity, vibro-travel.

Надежность работы энергоблоков в значительной мере определяется их вибрационным состоянием, где основным источником возбуждающих воздействий является валопровод.

Негативные последствия даже умеренной вибрации имеют свойство накапливаться и проявляться в виде усталостных трещин в роторе, штоках регулирующих клапанов, чугунных опорах; повреждений уплотнений турбин и системы охлаждения; полусухого трения в подшипниках; ухудшения работы системы регулирования. Следует также учитывать ее негативное воздействие на обслуживающий персонал.

Анализ вибрации турбоагрегата показывает, что ей свойственен сложный временной характер. Если определяющая спектр вибрация установки имеет частоту, равную примерно половине частоты вращения, ее относят к низкочастотной, а если ее частота вдвое выше частоты вращения, считают, что ротор подвержен высокочастотной вибрации.

Если в сложном колебательном процессе доминирует синусоида оборотной частоты, его называют вибрацией оборотной частоты.

Каждый вид вибрации имеет свою природу формирования, а потому необходимы конкретные меры ее устранения.Так, вибрация оборотной частоты возникает из-за несовпадения центров тяжести отдельных сечений ротора с осью вращения. Причинами могут служить неуравновешенность валопровода и его прогибы вследствие тепловой анизотропии, задевания деталей ротора о статор, протечки теплоносителя или масла внутрь полостей ротора; нарушения плотности посадки деталей; недостаточная жесткость опорной системы.

Основными причинами возбуждения

низкочастотной вибрации служат два фактора: масляный (гидродинамический), источником которого является нестационарность давлений в масляном слое подшипника, и газодинамический, создаваемый в проточной части энергией рабочего тела.

Высокочастотная вибрация формируется под воздействием несимметричности сечений вала (анизотропности ротора), основными источниками которой служат электрогенератор, имеющий разножесткость сечений ротора; ослабление крепежа насадных деталей валопровода; шпоночные пазы дисков, колес насосов и т.д.

На вибрационные характеристики турбомашин оказывают существенное влияние многие конструктивные и режимные факторы: дефекты муфт, несоосность жестко связанных валов, продольная вибрация радиальных подшипников, тепловые и вибрационные деформации опорных плит и фундаментов.

С учетом того, что каждому классу турбоагрегатов свойственна определенная виброактивность, «Правилами технической эксплуатации газоперекачивающих агрегатов» предусмотрены жесткие нормы ее допустимых значений для отдельных типов энергоблоков, установлены гигиенические показатели при эксплуатации.

Нормы вибрации предусматривают возможность длительной работы турбоагрегатов при виброскорости корпусов подшипников не более 2,8 мм/с, что эквивалентно размаху колебаний 15мкм. Допускается кратковременная эксплуатация при ее значении 4,5 мм/с, а при превышении уровня 7,1мм/с (размахе более 40мкм) работа турбомашин должна быть прекращена.

Санитарными нормами вибрация прилегающих к энергоблоку площадок обслуживания ограничивается виброскоростью на уровне 2,0 мм/с (92 дБ) на частотах свыше 8 Гц.

Для детального изучения вибрационного состояния турбоблоков необходимы специальные виброакустические исследования, в процессе которых должны быть установлены: характер вибрационных процессов, причины повышенной вибрации, явления, способствующие интенсификации колебательных процессов энергоустановок.

С целью систематизации и накопления таких материалов были выполнены исследования виброактивности работающих на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов газоперекачивающих агрегатов (ГПА) с судовым газотурбинным приводом. Объектом изучения служила установка типа ГПА-16МГ90 мощностью 16МВт, где в качестве привода нагнетателя природного газа типа 370-18-1 НЗЛ использован судовой конвертируемый двигатель ДГ-90 производства ПО «Заря».

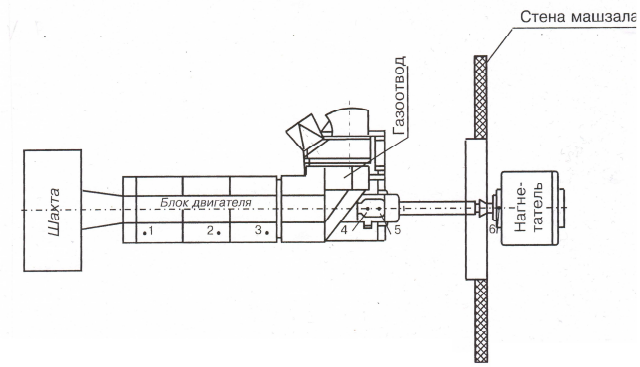


Рис. 1. Схема расположения точек измерения Вибрации ГПА–16МГ 90:
1…6 – точки измерения уровня вибрации

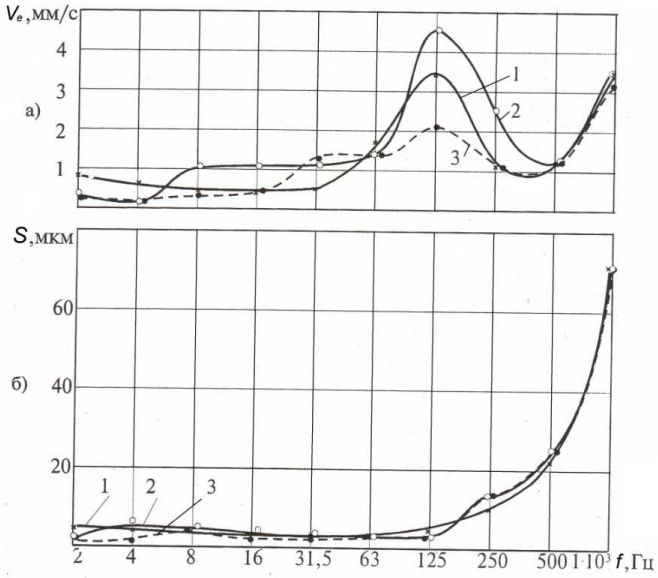


Рис. 2. СКЗ виброскоростей V_e(а) и пиковые значения виброперемещений S(б) опорного подшипника СТ: 1, 2, 3– соответственно вертикальное, поперечное

При изучении вибрационных харак-

теристик ГПАна номинальном режиме эксплуатации в качестве анализируемых параметров были использованы среднеквадратические значения (СКЗ) виброскоростей крышек подшипников V_e (мм/с) и амплитуда смещения S(мкм), которые регистрировались в вертикальном, поперечном и продольном направлениях (относительно оси ротора) в октавной полосе частотного диапазона 2…10^3 Гц.

Гигиенические показатели агрегата оценивались по СКЗ виброскоростей рабочих площадок обслуживания (дБ) в частотном диапазоне 2…63 Гц.

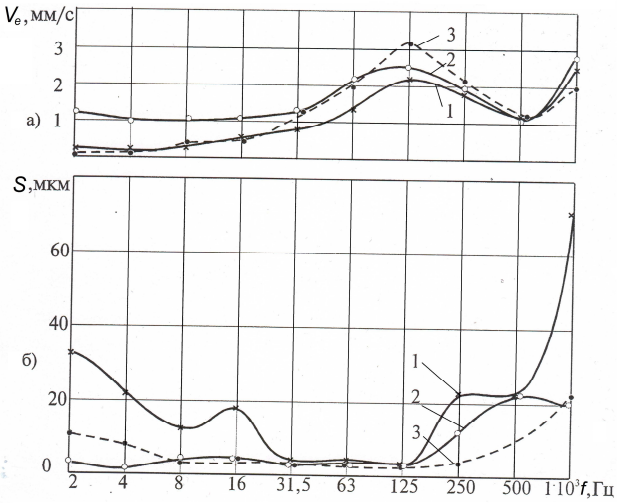


Рис. 3. СКЗ виброскоростей V_e(а) и пиковые значения виброперемещений S(б) опорно-упорного подшипника СТ: 1, 2, 3– соответственно вертикальное, поперечное и продольное направления

Интенсивность вибрации корпусов установки (переднего блока корпуса КНД, переходного узла компрессоров и опорного венца силовой турбины) регистрировалась в контрольных точках (рис. 1, поз. 1,2,3), где в поперечном направлении мерялись СКЗ виброскоростей. Они составили соответственно 6,0; 5,5 и 7,0мм/с, что можно считать допустимым для вибрации корпусных деталей двигателя.

На рис. 2 проиллюстрированы СКЗ виброскоростей и пиковые значения виброперемещений опорного подшипника силовой турбины (СТ) установки (рис. 1, поз. 4).

Как видно, максимальной виброскоростью этот узел обладает на частотах около 125 Гц, где в поперечном направлении V_{emax} = 4,5 мм/с (рис. 2а). Экстремальные значения амплитуды виброперемещений наблюдались в области высоких частот (f=1кГц) во всех трех направлениях. Эти

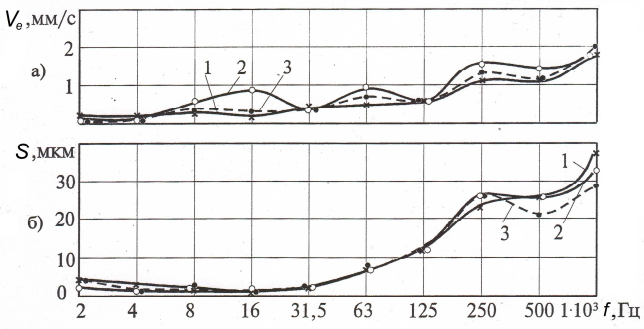


Рис. 4. СКЗ виброскоростей V_e(а) и пиковые значения виброперемещений S (б) опорно-упорного подшипника нагнетателя газа типа 370–18–1: 1, 2, 3– соответственно вертикальное, поперечное и продольное направления

значения в вертикальной плоскости достигали S_{max}=70…75 мкм(рис. 2б).

На опорно-упорном подшипнике СТ (рис. 1, поз. 5) наибольшие виброскорости зафиксированы также на частотах ≈125 Гц, где в продольном направлении V_{emax}=3,2 мм/с (рис. 3а). Максимальное виброперемещение, как и в опорном подшипнике этой турбины, наблюдалось на частотах f≈ 1 кГц, где его уровень достигал S_{max}=70 мкм (рис. 3б).

Вибрационное обследование СТ газотурбинного двигателя типа ДГ-90 освидетельствует о необходимости разработки мероприятий по снижению ее виброактивности посредством технической модернизации.

Исследование вибрационных характеристик опорно-упорного подшипника нагнетателя (рис. 1, поз. 6) позволило установить, что во всех трех направлениях наибольшая виброактивность зарегистрирована на частотах f ≈1кГц, где контролируемые параметры имели следующие значения:V_{emax}=2,0 мм/с (рис. 4а), S_{max}= 37 мкм (рис. 4б).

Результаты измерений свидетельствуют о необходимости принятия мер по устранению повышенной вибрации опорно-упорного подшипника нагнетателя типа 370-18-1.

С целью изучения гигиенических условий работы персонала, обслуживающего

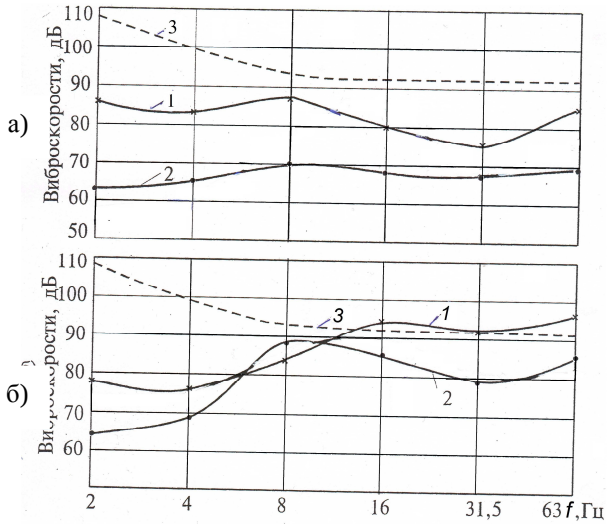


Рис. 5. Виброскорости большой (а) и малой (б) площадок обслуживания ГПА-16МГ: 1,2 – соответственно вертикальное и поперечное направления; 3 – ПДУ

установку типа ГПА–16МГ90, выполнены измерения вибрационных характеристик поверхностей прилегающих к агрегату большой и малой площадок обслуживания. Исследования показали, что виброактивность большой площадки ГПА в изученном диапазоне частот не превышает предельно допустимый уровень (ПДУ) (рис. 5а), в то время как вибрационные показатели малой площадки на частотах 16 и 63 Гцвыше санитарных норм (рис. 5б), а потому необходимо оборудование ее специальными амортизирующими устройствами или монтаж пола на упругом основании.

Опыт энергомашиностроения показал, что наиболее эффективным способом уменьшении виброактивности турбоблоков является разработка мер по снижению динамической неуравновешенности системы в источниках ее формирования при конструкторской проработке как на стадии проектирования, так и на стадии модернизации и доводки технических образцов.

Вместе с тем на тепловых и компрессорных станциях широко используютсяпассивные способы сокращения генерируемых в системах нестационарных колебательных процессов, распространяющихся по структуре турбомашин. Такие виды гашения возмущающих сил могут быть реализованы на практике путем конструктивной амортизации оборудования и составляющих элементов установок с помощью специальных опорных устройств и систем виброгашения, оснащенных высокоэффективными вибродемпфирующими материалами, вибропоглощающими покрытиями и конструкциями [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроконов, А.М. Генерация и методы снижения виброакустической активности в турбомашинах / А.М. Дроконов, Т.А. Николаева. – Брянск: БГУ, 2012. – 222с.

1. Drokonov, A.M. Generation and Methds for Vibroacoustic Activity Decrease in Turbomachines / A.M. Drokonov, T.A. Nikolayeva. – Bryansk: BSTU, 2012. – pp. 222.

Статья поступила в редколлегию 6.10.2015.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Обозов А.А.

Сведения об авторах:

Дроконов Алексей Михайлович, к.т.н., профессор кафедры «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета, e-mail: heat@tu-bryansk.ru.

Drokonov Alexey Mikhailovich, Can.Eng., Prof. of the Dep. “Heat-Engines” Bryansk State Technical University, e-mail: heat@tu-bryansk.ru.

УДК 531/534
DOI: 10.12737/20247

Е.С. Цуканова

АНАЛИЗ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ УДАРНОЙ НАГРУЗКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Рассмотрен динамический расчет стержневых систем при ударной нагрузке с помощью метода конечных элементов. Для дискретизации систем использован динамический элемент, функции формы которого представляют собой точные колебательные формы элементов конструкции. Приведена оценка погрешностей расчета при использовании классического конечного элемента с линейными функциями формы. Показана эффективность применения динамического элемента для расчета систем при ударной нагрузке.

Ключевые слова: метод конечных элементов, функции формы, динамический конечный элемент, стержневые системы, ударная нагрузка.

C.S. Tsukanova

ROD SYSTEMS ANALYSIS BY FINITE ELEMENT METHOD AT LOAD IMPACT WITH USE OF DYNAMIC ELEMENT

A dynamic computation for rod systems at load impact with the aid of the finite element method is considered. For the digitization of systems there was used a dynamic element, the form functions which are the exact oscillating forms of structure elements. An error estimate of the computation at the use of a classic finite element with linear functions of a form is shown. The effectiveness of dynamic element application for the computation of systems at a load impact is presented.

Key words: finite element method, form functions, dynamic finite element, rod systems, load impact.

Конечный элемент, позволяющий получить точные значения собственных частот стержневых конструкций, подробно описан в работе [1], где для дискретизации стержневых систем используется специальный динамический конечный элемент (ДКЭ). Точность расчета достигается путем применения функций формы, являющихся точными колебательными формами элементов. Эффективность данного подхода показана на примерах динамического расчета некоторых конструкций. Также была решена задача вынужденных колебаний с гармонической возмущающей силой [2].

В данной работе решается динамическая задача при ударной нагрузке. Определены амплитудные значения перемещений точек приложения удара, а также их движения во времени. Для простейших систем полученные результаты полностью совпадают с результатами, полученными аналитическим путем. Анализ динамики систем был также проведен с использованием конечного элемента с функциями формы в виде полиномов Эрмита, была определена погрешность его применения по сравнению с динамическим элементом.

Ударная нагрузка представляет собой кратковременно приложенную силу в начальный момент времени. Предположим на данном этапе, что сила удара описывается синусоидой с частотой, например, в 10 раз выше первой собственной частоты k_1 конструкции:

$$P(t) = \begin{cases} \sin(10k_1 t), 0 \le t < \dfrac{\pi}{10k_1}; \\ 0, t > \dfrac{\pi}{10k_1}. \end{cases} \quad (1)$$

Перемещения стержня определяются с помощью интеграла Дюамеля:

$$U(x,t) = \int_0^t \dot{P}(\tau) R_1(x, t-\tau) d\tau, \quad (2)$$

где $R_1(x, t)$ – реакция системы на внезапно приложенную единичную нагрузку.

Определение реакции системы на единичную нагрузку аналогично решению задачи о вынужденных колебаниях. В частности, конфигурации консольного стержня (рис. 1) определяются по формулам:

$u_0(x) = \frac{P_1(0)x}{EF}$ - при растяжении;

$u_0(x) = \frac{P_1(0)lx^2}{3EI}$ – при изгибе.

Задача определения реакции на единичную нагрузку приводится к задаче определения движения системы по начальным условиям. В качестве начальных (3) вий принимаются конфигурация стержня при действии единичной силы и нулевое распределение скоростей:

$$u_0 = u_0(x), \qquad v_0(x) = 0$$

В общем виде движение стержня определяется по формуле

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n(x) A_n \sin(k_n t + \varphi_n),$$

где $U_n(x)$ – собственные формы колебаний стержня.

Скорость движения точек стержня:

$$\frac{du}{dt} = v(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n(x) A_n k_n \cos(k_n t + \varphi_n).$$

Воспользуемся свойством ортогональности собственных форм:

$$\int_0^l u_0(x) U_m(x) dx = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\varphi_n \int_0^l U_m(x) U_n(x) dx = A_m \sin\varphi_m \int_0^l [U_m(x)]^2 dx;$$

$$\int_0^l v_0(x) U_m(x) dx = \sum_{n=1}^{\infty} A_n k_n \cos\varphi_n \int_0^l U_m(x) U_n(x) dx = k_m A_m \cos\varphi_m \int_0^l [U_m(x)]^2 dx.$$

В случае одностержневой конструкции амплитуда точки приложения силы вычисляется следующим образом:

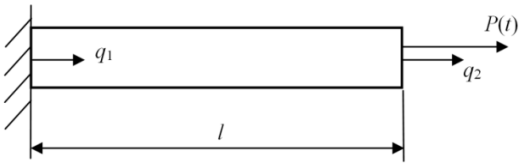
$$A_m = \frac{\int_0^L u_0(x) U_m(x) dx}{\int_0^L U_m^2(x) dx}, \qquad (4)$$

где $U_m(x)$ – собственные формы колебаний стержня.

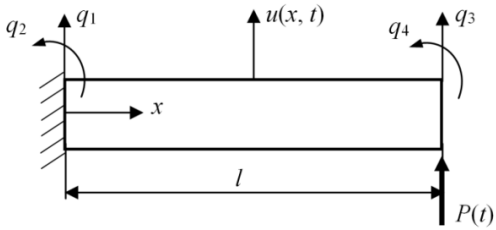
Окончательно реакция стержня на единичный скачок записывается следующим образом:

$$R_1(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n U_n(x) \sin(k_n t). \qquad (5)$$

В качестве простейшей динамической системы, для которой получено аналитическое решение, совпадающее с решением по методу ДКЭ, рассматривается консольный стержень, работающий на растяжение (рис. 1а) и изгиб (рис. 1б).



а)



б)

Рис. 1. Расчетные схемы стержней: а - работающего на растяжение; б – изгибаемого

В табл. 1 и 2 представлено сравнение результатов динамического расчета работающего на растяжение и изгибаемого стержней при начальных условиях (3), полученных различными методами: аналитическим, с использованием динамического конечного элемента, с использованием классического элемента при разном числе

разбиений стержня. Для классического элемента показана относительная погрешность расчета (в %). Перемещения точки представлены в виде отношения двух амплитуд $A_{уд}/A_{ст}$, где $A_{уд}$ – амплитудное перемещение при начальных условиях (3), $A_{ст}$ – перемещение точки под действием статической единичной силы.

Таблица 1

Амплитудные перемещения стержня, работающего на растяжение, в точке приложения силы

Параметр	№ частоты	ДКЭ (1 элемент)	МКЭ (1 элемент)	МКЭ (2 элемента)	МКЭ (4 элемента)	МКЭ (10 элементов)
$A_{уд}/A_{ст}$	1	0,811	1,000 (+23,31%)	0,854 (+5,30%)	0,821 (+1,23%)	0,812 (+0,12%)
	2	0,090	-	0,146 (+62,22%)	0,101 (+12,22%)	0,092 (+2,22%)
	3	0,032	-	-	0,045 (+40,63%)	0,034 (+6,25%)
	4	0,017	-	-	0,032 (+88,24%)	0,018 (+5,88%)

Из табл. 1 видно, что в случае растяжения при небольшом числе разбиений наблюдается значительная погрешность. Это можно объяснить тем, что при малом числе разбиений классический конечный элемент плохо аппроксимирует форму колебаний стержня. Как следует из зависимости (4), форма колебаний является определяющим фактором при расчете амплитуды системы с заданными начальными условиями (3).

Реакции на единичный скачок стержня, работающего на растяжение и сжатие, при разном числе элементов показаны на рис. 2.

Движение точки приложения удара во времени определяется по зависимости (2) и для стержня, работающего на растяжение-сжатие, имеет вид, представленный на рис. 3.

Рис. 3 показывает движение стержня при частоте ударной нагрузки $k_{уд}$, превышающей первую собственную частоту стержня в 10 раз. При увеличении частоты ударной нагрузки характер движения сохраняется, однако происходит уменьшение амплитуды. На рис. 4 показано движение стержня, работающего на растяжение, при частоте удара, превышающей первую собственную в 10, 20, 50 и 100 раз.

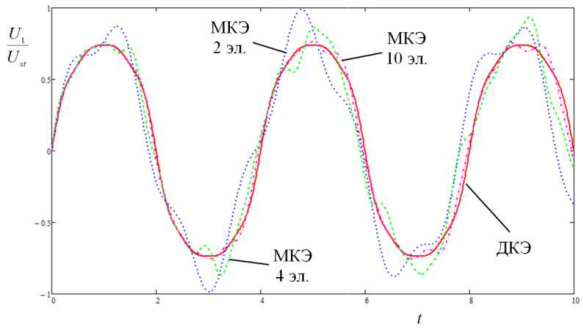


Рис. 2. Реакции на единичный скачок стержня, работающего на растяжение

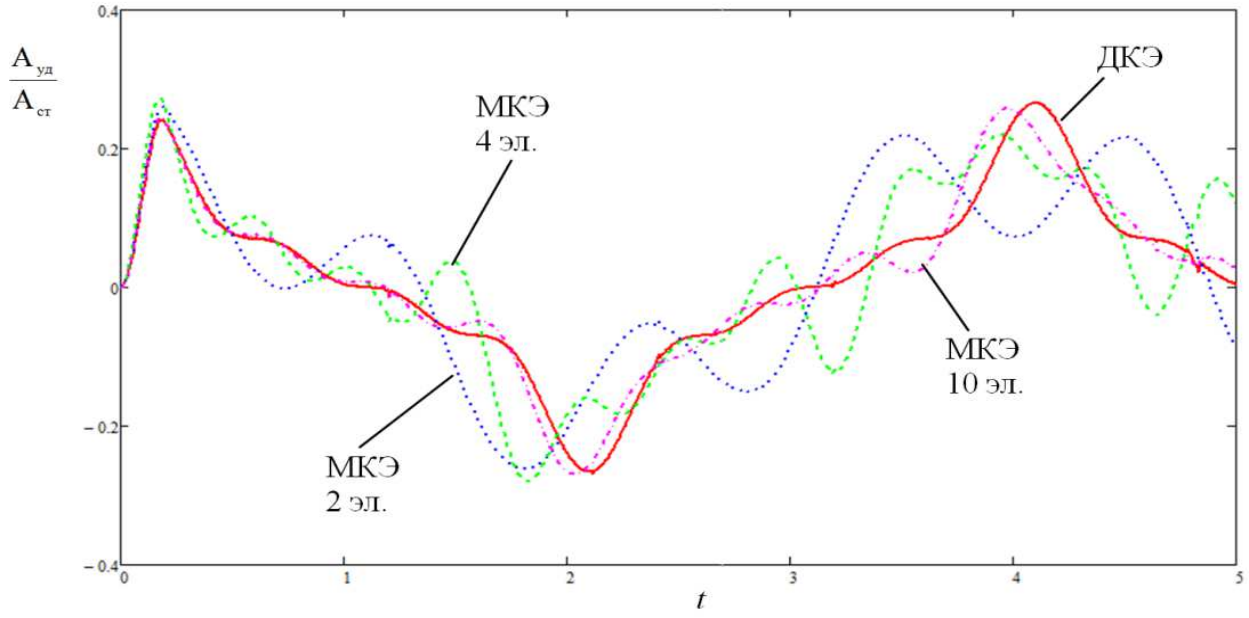


Рис. 3. Движение стержня, работающего на растяжение и сжатие

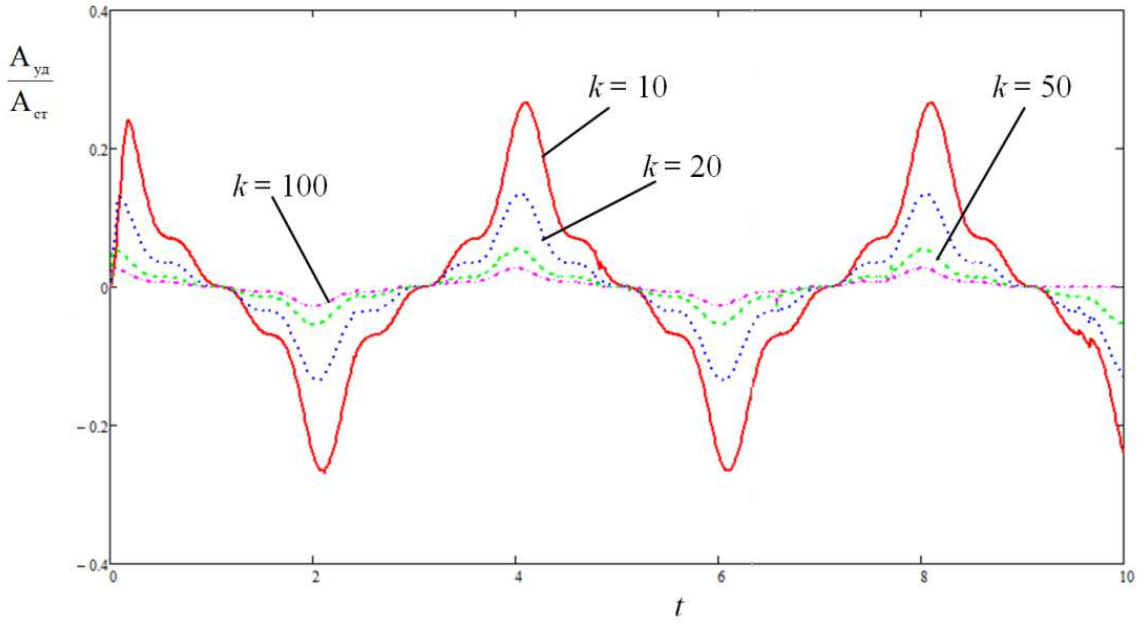


Рис. 4. Движение стержня, работающего на растяжение, при разной частоте удара

Амплитудные перемещения изгибаемого стержня в точке приложения силы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Амплитудные перемещения изгибаемого стержня в точке приложения силы

Параметр	№ частоты	ДКЭ (1 элемент)	МКЭ (1 элемент)	МКЭ (2 элемента)	МКЭ (4 элемента)	МКЭ (10 элементов)
$A_{уд}/A_{ст}$	1	2,161	2,162 (+0,05%)	2,162 (+0,05%)	2,161 (+0,00%)	2,161 (+0,00%)
	2	1,760	2,162 (+22,84%)	1,743 (-0,97%)	1,747 (-0,74%)	1,754 (-0,34%)
	3	1,025	-	1,124 (+10,74)	0,982 (-3,25%)	1,001 (-1,38%)
	4	0,728	-	0,605 (-16,90%)	0,702 (-3,57%)	0,708 (-2,75%)

Из табл. 2 видно, что при изгибе получаются меньшие погрешности, чем при растяжении. Это можно объяснить тем, что в случае изгиба функции формы классического элемента лучше аппроксимируют истинные колебательные формы стержня (высокая точность аппроксимации достигается на первых двух частотах).

Ниже показаны реакции на единичный скачок изгибаемого стержня в точке приложения силы (рис. 5) и суммарное движение системы (рис. 6), полученные на основе зависимостей (5) и (2) соответственно.

Таким образом, на основе полученных реакций на единичный скачок можно вычислить перемещения стержня при действии ударной нагрузки (1). Перемещения стержня в таком случае определяются с помощью интеграла Дюамеля по зависимости (2).

При увеличении частоты ударной нагрузки, как и в случае растяжения, сохраняется характер движения и уменьшается его амплитуда (рис. 7).

Таким образом, как и в предыдущих работах, на примере простейших стержневых систем показана эффективность применения динамического конечного элемента для анализа конструкций.

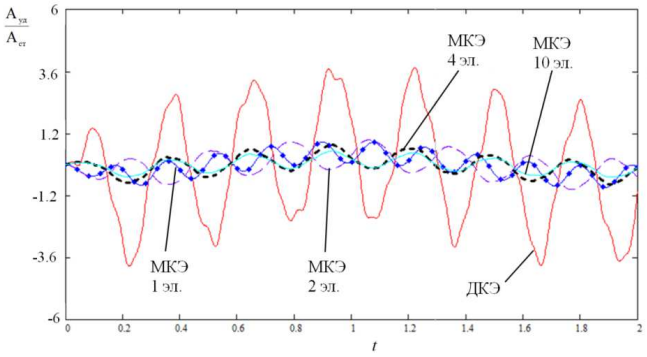


Рис. 5. Реакции на единичный скачок стержня, работающего на изгиб

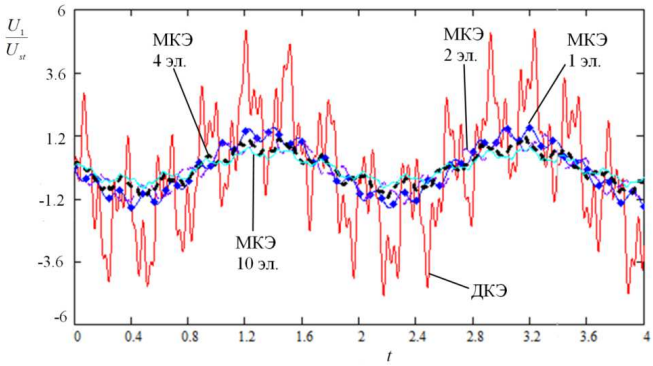


Рис. 6. Движение стержня, работающего на изгиб

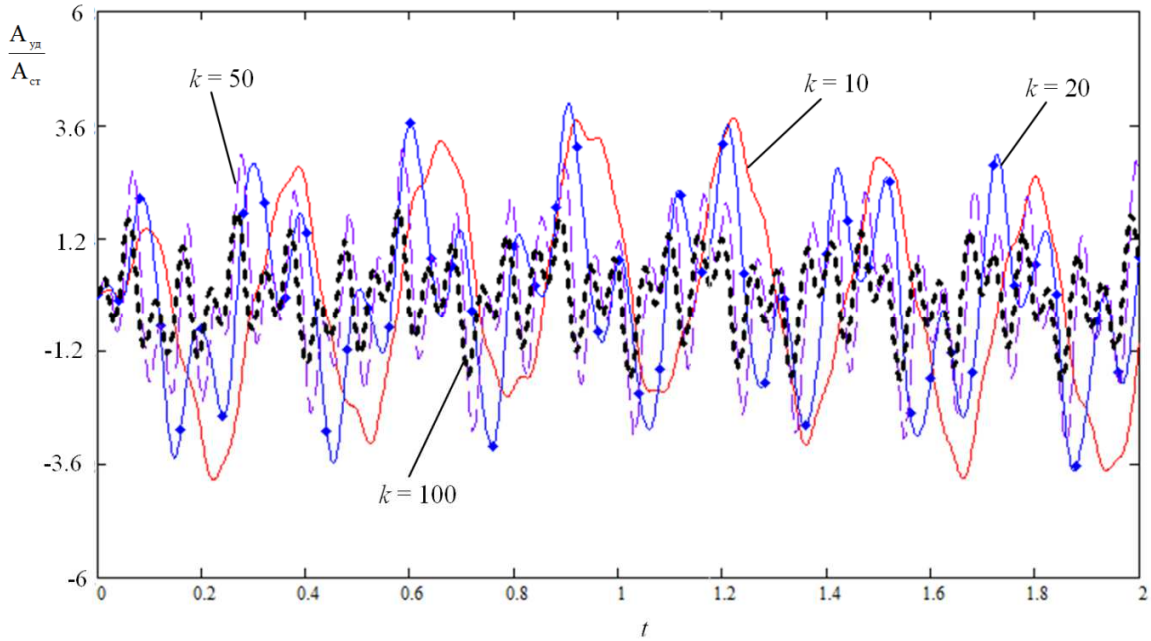


Рис. 7. Движение стержня, работающего на изгиб, при разной частоте удара

Динамический конечный элемент позволяет проводить точный расчет более сложных конструкций, когда аналитическое решение получить затруднительно. В случае стержневых систем амплитуда точки приложения ударной нагрузки имеет следующий вид:

$$A_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} \int_0^L u_0(x) U_n(x) dx}{\sum_{i=1}^{n} \int_0^L U_n^2(x) dx}, \qquad (6)$$

где n – число стержней.

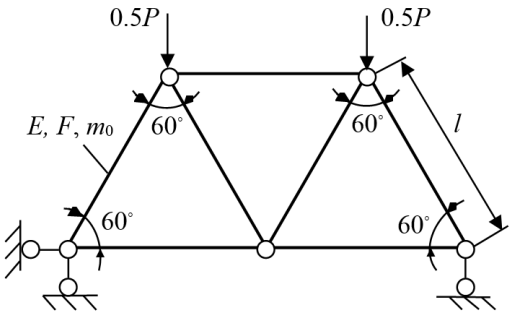


Рис. 8. Расчетная схема плоской фермы

В качестве сложной стержневой системы для случая растяжения по аналогии с предыдущими работами рассмотрим плоскую ферму, представленную на рис. 8.

Стержни фермы идентичны по геометрии и свойствам материала. К ферме приложен единичный импульс, который распределяется пополам между узлами верхнего горизонтального стержня.

В табл. 3 представлено сравнение результатов расчета амплитуд точек приложения ударной нагрузки (по вертикали). Амплитуды точек приложения нагрузки получаются одинаковыми ввиду симметричности фермы. Расчет выполнен с применением динамического конечного элемента и классического элемента с линейными функциями формы. Для классического элемента показана относительная погрешность расчета (в %). Перемещения точки представлены в виде отношения двух амплитуд $A_{уд}/A_{ст}$, где $A_{уд}$ – амплитудное перемещение при ударе, $A_{ст}$ – перемещение точки под действием статической единичной силы.

Таблица 3

Перемещения точки приложения удара плоской фермы

Параметр	№ частоты	ДКЭ	МКЭ (1 элемент)
$A_{уд}/A_{ст}$	1	0,170	0,142 (-16,47%)
	2	0,114	0,122 (+7,10%)
	3	0,110	0,118 (+7,27%)
	4	0,200	0,244 (+22,00%)
	5	0,079	0,186 (+135,44%)

Из табл. 3 видно, что при увеличении частоты растёт погрешность расчета при использовании классического конечного элемента с линейными функциями формы.

На рис. 9 приведена реакция фермы на единичный скачок в точках приложения нагрузки, полученная на основе выражений (5) и (6).

Перемещения фермы от ударной нагрузки (1) после интегрирования согласно (2) имеют вид, показанный на рис. 10.

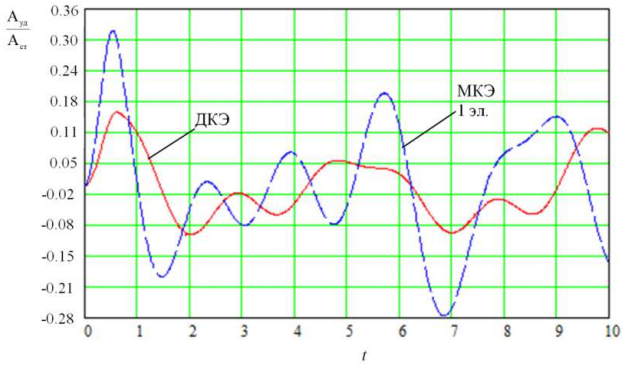


Рис. 9. Реакция фермы на единичный скачок в точках приложения нагрузки

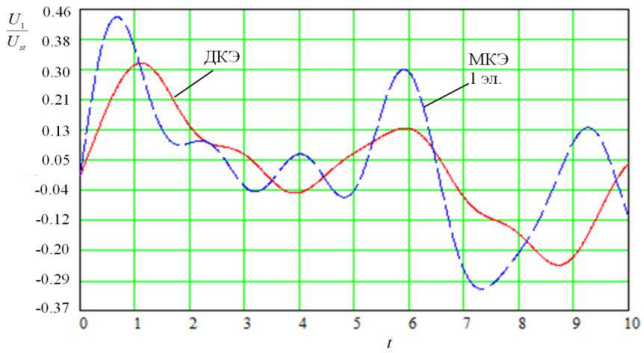


Рис. 10. Перемещения фермы в точках приложения ударной нагрузки

При увеличении частоты ударной нагрузки уменьшается амплитуда колебаний (рис. 11).

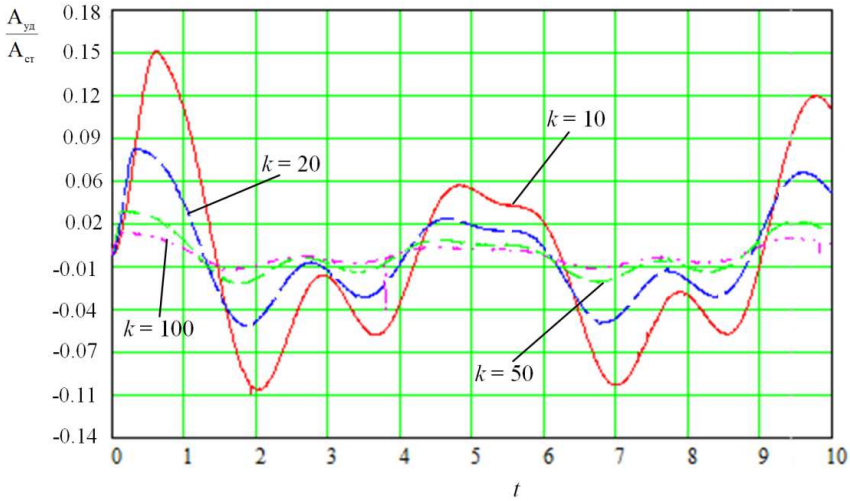


Рис. 11. Перемещения фермы при разной частоте ударной нагрузки

Для случая изгиба по аналогии с предыдущими работами рассмотрим стержневую систему в виде Г-образной рамы (рис. 12).

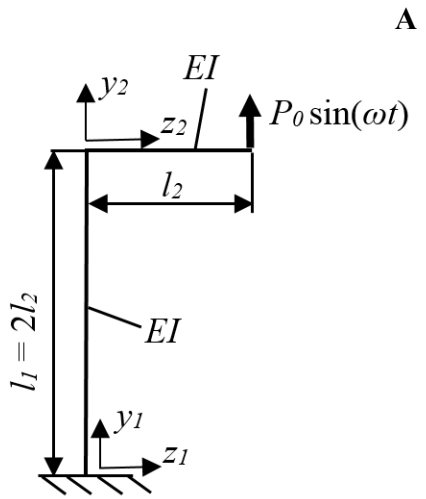


Рис. 12. Расчетная схема Г-образной рамы

В табл. 4 приведены результаты расчета амплитуд точки приложения удара горизонтального стержня при использовании динамического конечного элемента и классического элемента с линейными функциями формы. Для классического элемента показана погрешность расчета (в %) относительно ДКЭ. Перемещения точки представлены в виде отношения двух амплитуд $A_{уд}/A_{ст}$, где $A_{уд}$ – амплитудное перемещение при ударе, $A_{ст}$ – перемещение точки приложения нагрузки под действием статической единичной силы.

Из табл. 4 видно, что при малом числе элементов погрешность расчета при использовании классического конечного элемента высока.

На рис. 13 приведены реакции на единичный скачок точки приложения нагрузки рамы при использовании ДКЭ и классического КЭ при разном числе разбиений стержней.

Таблица 4

Амплитуды точки приложения удара Г-образной рамы

Параметр	№ частоты	ДКЭ (1 элемент)	МКЭ (1 элемент)	МКЭ (2 элемента)	МКЭ (3 элемента)
$A_{уд}/A_{ст}$	1	11,576	10,902 (-5,82%)	10,524 (-9,09%)	11,914 (+2,92%)
	2	13,703	9,433 (-31,16%)	14,458 (+5,51%)	14,845 (+8,34%)
	3	13,155	17,120 (+30,14%)	13,267 (+0,85%)	18,889 (+43,59%)
	4	27,778	67,847 (+144,25%)	27,816 (+0,14%)	23,420 (-15,69%)

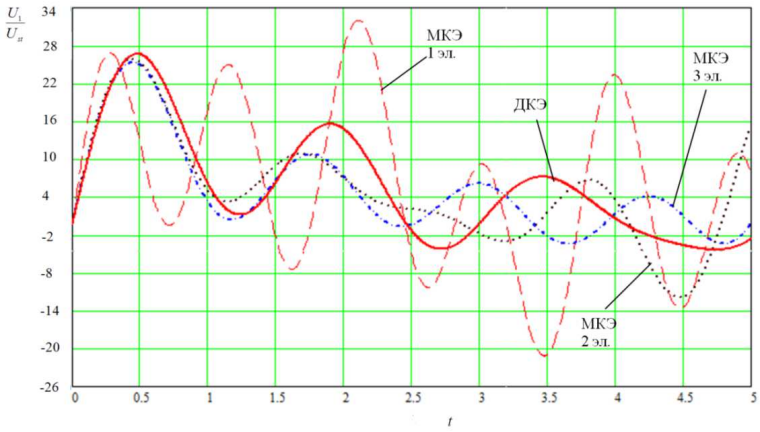


Рис. 13. Реакции на единичный скачок точки А рамы

На рис. 14 показаны перемещения рамы в точке приложения удара (1), а на рис. 15 – те же перемещения, но при разной продолжительности действия нагрузки.

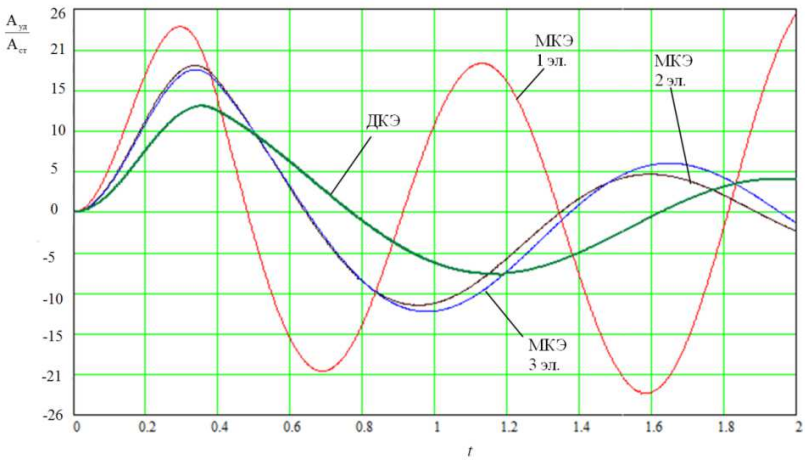


Рис. 14. Перемещения рамы в точке приложения ударной нагрузки

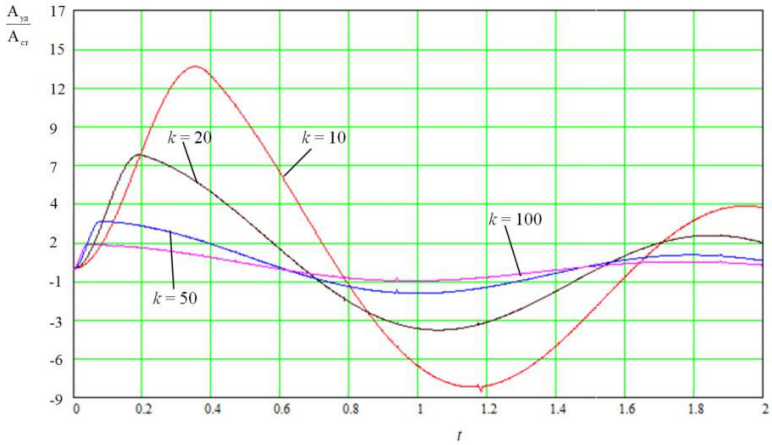


Рис. 15. Перемещения точки А рамы при разной Продолжительности удара

При дальнейшем увеличении числа разбиений кривые, полученные с применением классического элемента, приближаются к кривой, полученной с использованием динамического элемента.

В работе [1] показано, что использование точных решений уравнений колебаний стержней в качестве базисных функций для построения конечного элемента позволяет точно оценить собственные частоты систем. Данный подход также эффективен при вынужденных колебаниях стержневых систем при гармоническом возмущении и при оценке динамического напряженно-деформированного состояния конструкций [2].

В настоящей работе показана значительная эффективность применения динамического конечного элемента для анализа динамики стержневых конструкций при ударной нагрузке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цуканова, Е.С. Динамический конечный элемент / Е.С. Цуканова, Б.Г.Кеглин // Вестник Брянского государственного технического университета.- 2013.– №3(39). – С. 69 – 78.
2. Цуканова, Е.С. Расчет вынужденных колебаний стержневых систем методом конечных элементов с применением динамического конечного элемента / Е.С. Цуканова// Вестник Брянского государственного технического университета.- 2015.– №2(46). – С. 93 – 103.

1. Tsukanova, E.S. Dynamic finite element / E.S. Tsukanova, B.G. Keglin // Bulletin of Bryansk State Technical University.- 2013.– №3(39). – pp. 69 – 78.
2. Tsukanova, E.S. Computation of forced oscillations in rod systems by finite element method using dynamic finite element / E.C. Tsukanova// Bulletin of Bryansk State Technical University.- 2015.– №2(46). – pp. 93 – 103.

Статья поступила в редколлегию 6.10.2015.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Мирошников В.В.

Сведения об авторах:

Цуканова Екатерина Сергеевна, аспирант кафедры «Механика, динамика и прочность машин» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-08-10, e-mail: ex-xgerm@yandex.ru.

Tsukanova Catherine Sergeyevna, post graduate student of the Dep. “Mechanics, Dynamics & Machine Strength” Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-08-10, e-mail: ex-xgerm@yandex.ru.

УДК 62-225.864.9
DOI: 10.12737/20248

Е.В. Тулубенский, А.М. Дроконов, А.В. Осипов

СНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОДКОВООБРАЗНЫХ ВИХРЕЙ В СОПЛОВЫХ АППАРАТАХ ТУРБОМАШИН

Проанализированы аэродинамические характеристики исходной и модернизированных конструкций соплового аппарата турбомашины с использованием метода конечных элементов в системе автоматизированного проектирования Autodesk Simulation CFD 2014 360.

Ключевые слова: турбомашина, сопловой аппарат, перфорированный профиль, потери энергии, метод конечных элементов, Autodesk Simulation CFD.

E.V. Tulubensky, A.M. Drokonov, A.V. Osipov

INTENSITY DECREASE OF HORSESHOE WHIRLWINDS IN NOZZLE INSTRUMENTS OF TURBOMACHINES

In this research work there is offered an original method for nozzles designing allowing the structure improvement of the flow arriving in a distributor by means of manufacturing nozzle blades with a perforated input edge and a damping chamber located behind it or with cuts on the end areas of a blade. The analysis of aerodynamic properties of initial and updated variants of blades (perforation, making cuts and shears) is carried out with the use of the finite element method in the computation system of automated designing Autodesk Simulation CFD 2014 360. The analysis was carried out with the consideration of different grid models beginning with the simplest (from 500 000 finite elements) and ending with complex models with the closeness of finite elements near a blade profile (up to 2,000 000 finite elements). The research results show that the lowest level of velocities is observed in the variants with a perforated wall and longitudinal cuts. In such a way, these variants of embodiment allow decreasing considerably the intensity of horseshoe whirlwinds (up to 18-20%). A the analysis of pressure distribution in the output section in four variants of blade end area embodiment one can observe that in variants with a perforated wall and longitudinal cuts are seen the best values: in connection with lower pressure loss their effectiveness is on average about 0.2% higher, than the effectiveness of the initial model. The variants offered of the embodiment ensure also the decrease of vibro-acoustic activity of a stage.

Key words: turbomachine, nozzle instrument, perforated profile, power waste, finite element method, Autodesk Simulation CFD.

На сегодняшний день более 85% вырабатываемой в мире электроэнергии производится при помощи паротурбинных и газотурбинных двигателей. Поэтому поиск решений физико-технических проблем в данной области является весьма актуальной задачей энергетики. Одной из них является создание аэродинамически совершенных лопаточных аппаратов. Современные программные комплексы и системы автоматизированного проектирования позволяют исследовать различные варианты конструктивного оформления турбинных решеток с целью поиска оптимального решения. Вместе с тем анализ их аэродинамических качеств свидетельствует, что энергетические характеристики лучших вариантов сопловых каналов лишь незначительно превосходят эффективность, достигнутую опытным путем ранее, причем уровень её остается недостаточно высоким. Это свидетельствует о необходимости поиска новых подходов к решению рассматриваемой проблемы.

В настоящем исследовании предложен оригинальный метод проектирования сопл, позволяющий улучшить структуру поступающего в направляющий аппарат потока путем выполнения сопловых лопаток с перфорированной входной кромкой и расположенной за ней демпфирующей камерой (рис. 1). Такое конструктивное решение позволит снизить потери энергии в диафрагме за счет уменьшения толщины пограничного слоя вдоль сферы входной кромки и поверхности профиля сопловых лопаток (рис. 2).

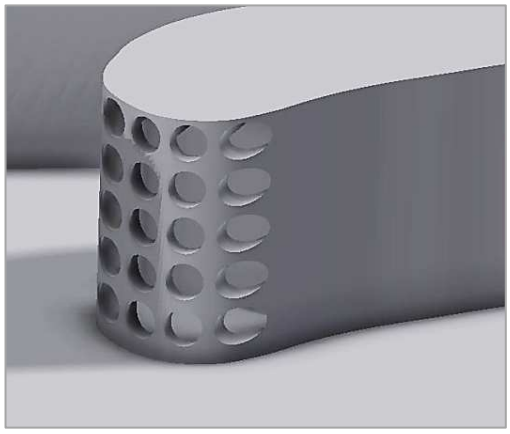


Рис. 1. Перфорированная поверхность входной кромки лопатки, соединяемая с внутренней камерой

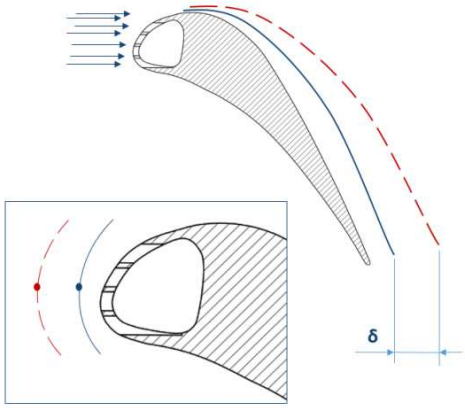


Рис. 2. Снижение толщины пограничного слоя: - - - - – без камеры; —— – с камерой

Снижение толщины пограничного слоя в данной конструкции можно ожидать за счёт частичного снижения интенсивности подковообразного вихря, возникающего на входной кромке лопатки. Набегая на лопатку, часть потока в результате торможения начинает смещаться в обратном направлении. Так как полное давление в нижних слоях пограничного слоя на торцевой стенке меньше, то возникает градиент давления, направленный от торцевой стенки. Из верхних слоев поток вдоль входной кромки движется к торцевой стенке, а затем поворачивается вдоль нее навстречу основному потоку и, взаимодействуя с ним, преобразуется в подковообразный вихрь [1;2]. Обтекая лопатку, этот вихрь разветвляется на два вихревых шнура, которые своими концами уходят в межлопаточные каналы, взаимодействуя с основным потоком (рис. 3). При использовании перфорированной стенки подковообразный вихрь разветвляется и попадает в специальную камеру (рис. 4).

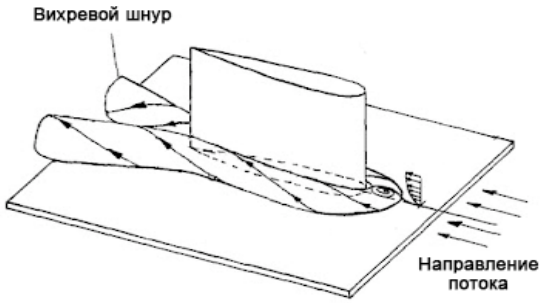


Рис. 3. Схема образования и разделения подковообразного вихря

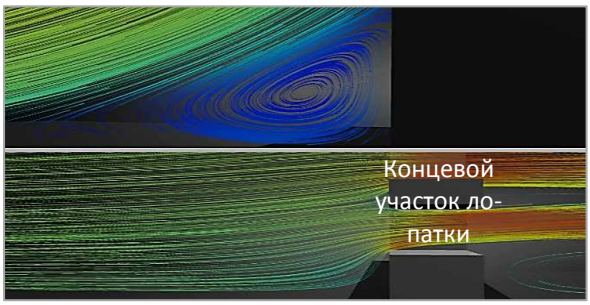
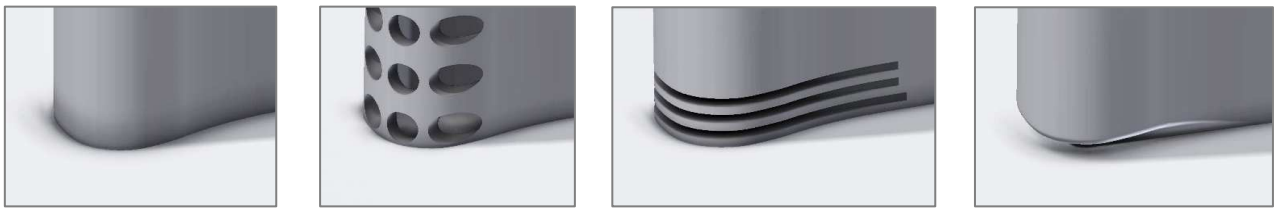


Рис. 4. Образование подковообразного вихря в исходной конструкции лопатки (сверху) и его разбиение при использовании перфорированной стенки (снизу)



а) б) в) г)

Рис. 5. Исследуемые варианты конструктивного исполнения концевых участков сопловых лопаток: а – исходный вариант; б – перфорированная стенка; в – продольные вырезы; г – срез

Помимо предложенного варианта разбиения подковообразного вихря спомощью перфорированной стенки также рассмотрен вариант выполнения на концевых участках лопатки щелей и среза специальной формы (рис. 5).

Анализ аэродинамических показателей исходного и модернизированных вариантов лопаток выполнен с использованием метода конечных элементов в расчетной системе автоматизированного проектирования AutodeskSimulationCFD 2014 360.

Проведение аэродинамического расчета потока в реальной геометрической модели всей сопловой решетки является сложной задачей и требует больших затрат ресурсов ЭВМ. Поэтому целесообразно использовать упрощенную расчетную модель, представляющую собой плоскую решетку, состоящую из трех лопаток [3].

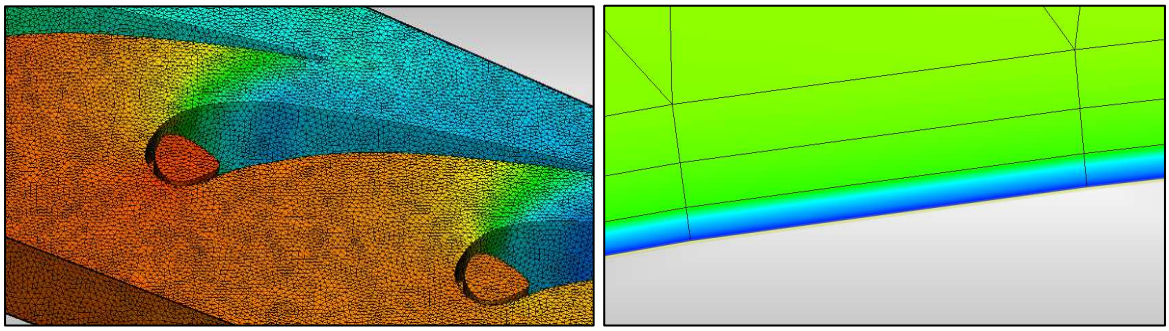
Расчетная модель была создана в системе автоматизированного проектирования AutodeskInventorProfessional 2013 и затем экспортирована в среду SimulationCFD, где уже непосредственно проводился анализ аэродинамических характеристик. В первую очередь задавались материалы и их свойства, затем задавались входные и выходные граничные условия.

Следует отметить, что SimulationCFD базируется на использовании так называемых облачных вычислений, т.е. расчёт проводится не на локальном компьютере, а на сервере компании-провайдера. Данные о решаемой задаче передаются по сети на удаленный компьютер, проводится решение задачи, а затем результаты расчета возвращаются обратно. Благодаря этой технологии открывается возможность выполнять вычисления на сложных расчетных моделях, для осуществления которых потребовалось бы иметь в наличии дорогостоящую и мощную ЭВМ.

Еще одним преимуществом данной расчетной системы является технология «MeshAdaptation», позволяющая автоматически на основании ряда расчетов шаг за шагом разбить сетку конечноэлементной модели в местах повышенного градиента параметров потока и тем самым получить более точные результаты.

Анализ проводился при рассмотрении различных сеточных моделей, начиная с простейших (от 500 000 конечных элементов) и заканчивая сложными моделями со сгущением конечных элементов возле профиля лопатки (до 2 млн конечных элементов). Одна из конечноэлементных моделей внутреннего объема представлена на рис. 6а. Следует отметить, что пограничный слой разбивается дополнительно на 3-15 элементарных объемов, в зависимости от настроек (рис. 6б), что приповышает точность результатов анализа [5;6]. Основной элемент сетки – тетраэдр, элемент объема пограничного слоя – призма.

Картины обратных течений в исходном и модернизированных вариантах представлены на рис. 7. На рис. 8 представлены картины течений рабочего тела непосредственно в камере перфорированного варианта входной кромки лопатки.



а) б)

Рис. 6. Отображение конечноэлементной модели в SimulationCFD (а) и увеличенный вид разбиения пограничного слоя (б)

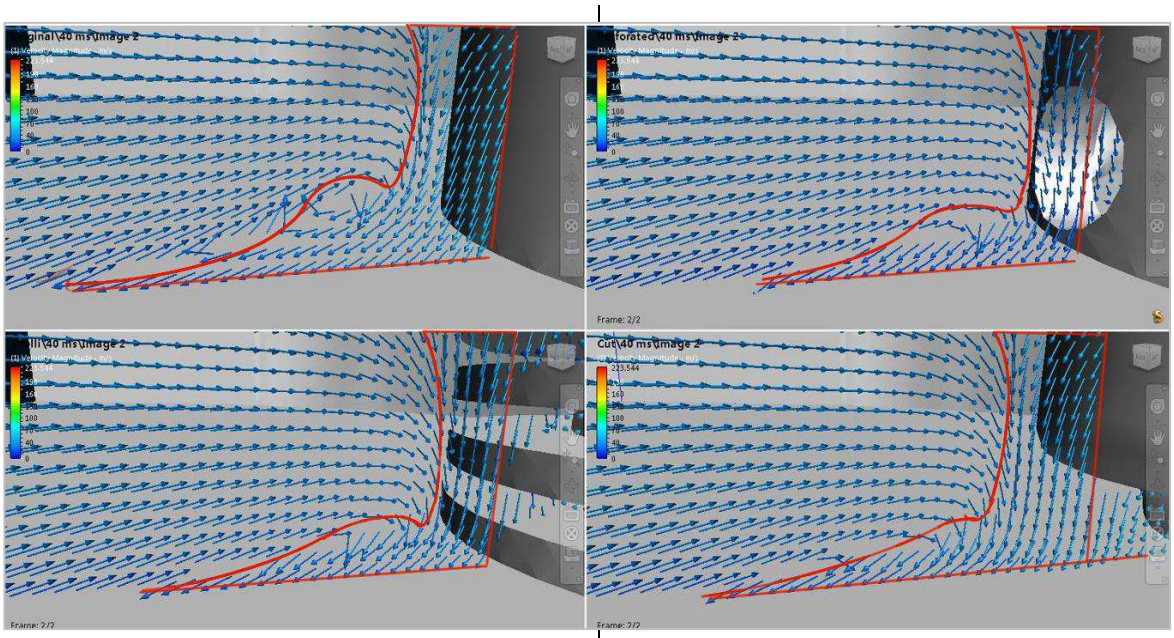


Рис. 7. Область обратных течений в районе входной кромки в каждом из конструктивных вариантов

Рассматривая структуру течения потока в демпфирующей камере, можно заключить, что отверстия на краях входной кромки, через которые данный поток выходит из камеры, необходимо выполнять под углом, близким к углу атаки основного потока, чтобы оказывать на него минимальное воздействие. Кроме того, в лопатках относительно малой высоты поток в камере выходит в окружающую среду преимущественно через концевые отверстия (возле торцевых поверхностей) в область вторичных течений, что несколько увеличивает концевые потери. В лопатках же относительно большой высоты поток выбивается из камеры практически через каждое отверстие по всей высоте и попадает как в область вторичных течений, так и в основной поток, что сказывается уже не только на концевых потерях, но и на профильных. Это свидетельствует о целесообразности использования предложенной конструкции преимущественно в лопатках относительно малой высоты.

Результаты моделирования свидетельствуют, что предложенная конструкция позволяет снизить толщину пограничного слоя на выходной кромке до 20% (рис. 9).

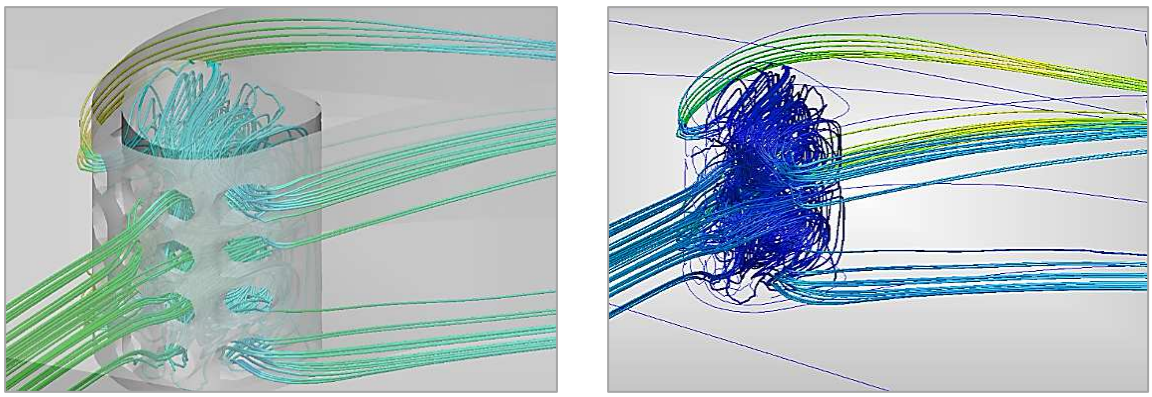
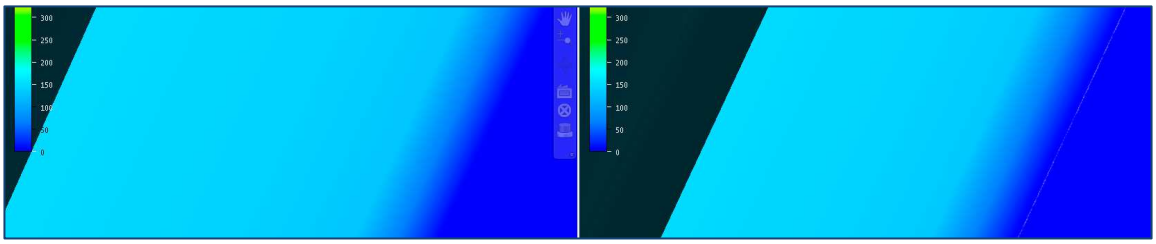


Рис. 8. Визуализация течения в камере соплового аппарата



а) б)

Рис. 9. Результаты моделирования на мелкой сетке (толщина пограничного слоя):
а – исходный вариант лопатки;б – модернизированный вариант

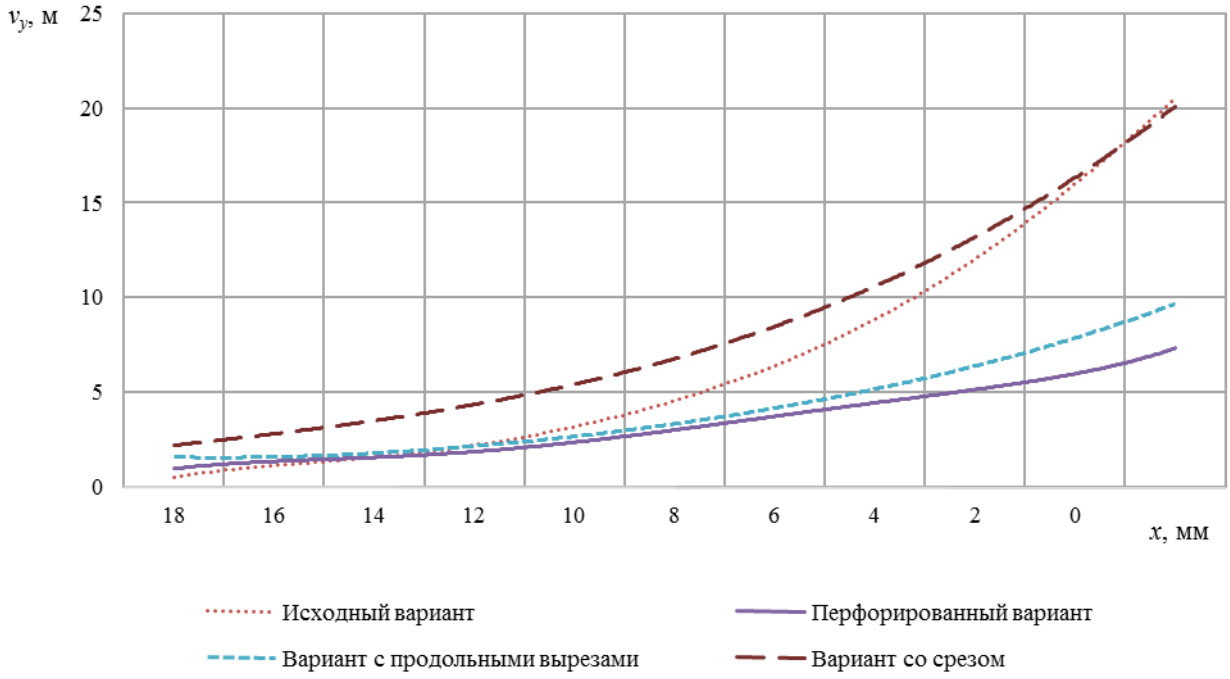


Рис. 10. Зависимость скорости радиальных течений v_y от расстояниях до входной кромки

На рис. 10 проиллюстрирована зависимость скорости радиальных течений от расстояния до концевых участков входной кромки. Как видно, наиболее низкий уровень скоростей наблюдается в вариантах с перфорированной стенкой и продольными вырезами. Таким образом, эти варианты конструктивного исполнения позволяют значительно снизить интенсивность подковообразных вихрей.

На рис. 11 представлено распределение давления в выходном сечении в 4 вариантах конструктивного исполнения концевых участков лопатки. В вариантах с перфорированной стенкой и продольными вырезами наблюдаются наилучшие показатели: в связи с более низкими потерями давления их эффективность в среднем примерно на 0,2% выше, чем эффективность исходной модели.

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложенные варианты конструктивного исполнения лопаточного аппарата позволяют снизить концевые потери потока в решетке за счет снижения интенсивности подковообразного вихря и соответствующего уменьшения толщины пограничного слоя на поверхности лопатки.

2. Наибольший эффект от снижения концевых потерь (в сравнении с исходным вариантом) достигается в вариантах с перфорированной стенкой и продольными вырезами(в решетках малой веерности).

3. Предложенная конструкция обеспечивает снижение виброакустической активности ступени [4].

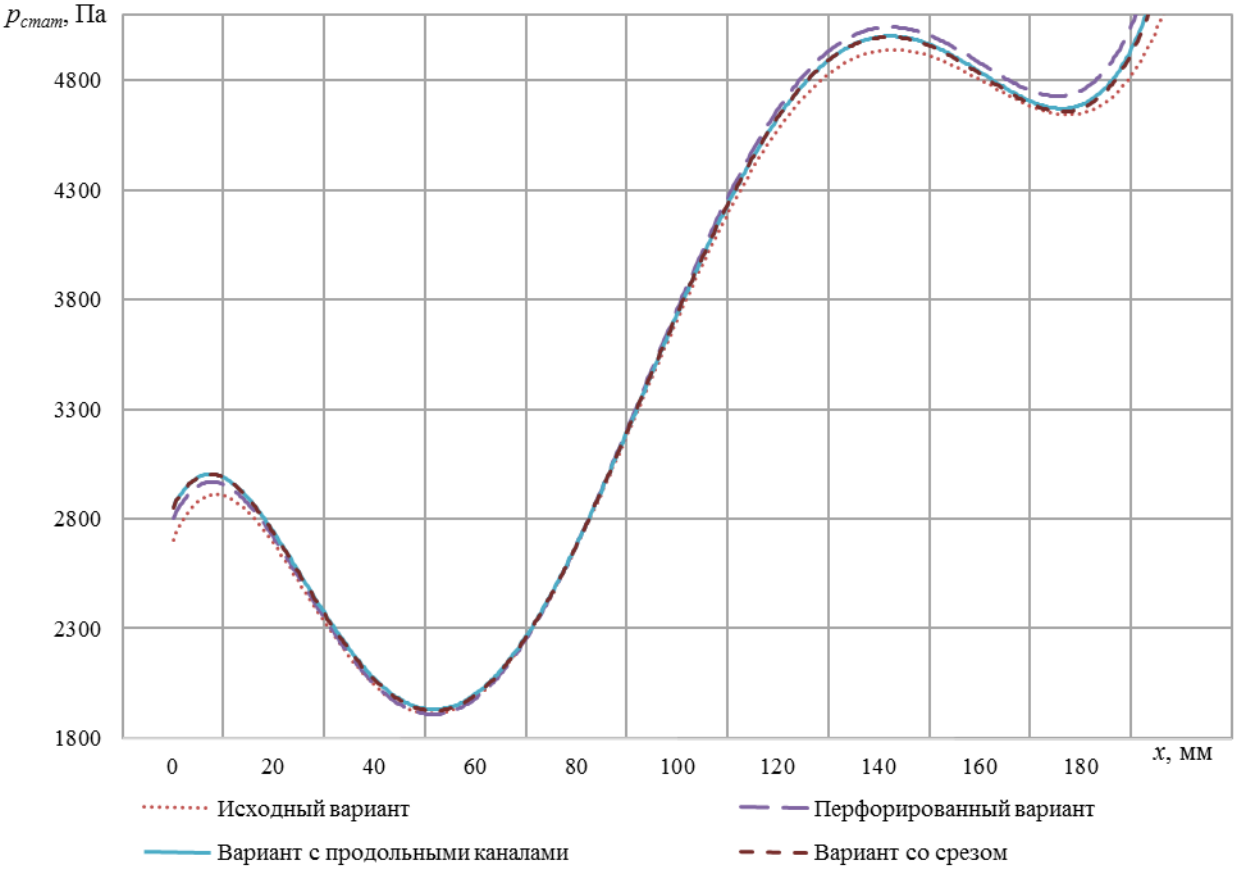


Рис. 11. Распределение статического давления в выходном сечении

Рис. 12. 3D-принтер (модель «UP! mini»)

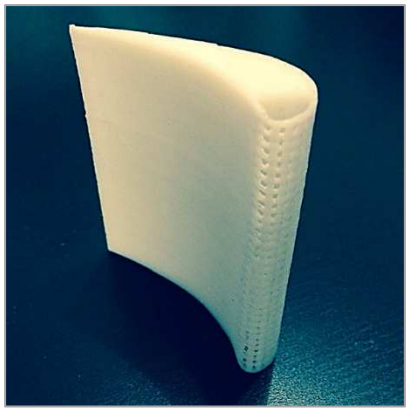


Рис. 13. Опытный образец лопатки

В настоящее время ведется подготовка физического эксперимента (продувка моделей лопаток, распечатанных на 3D-принтере (рис. 12, 13), в аэродинамической трубе), что позволит повысить достоверность результатов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh,G. Developmentofthree-dimensionalstageviscoustimemarchingmethodfo-roptimization of short height stages /G.Singh, P.J.Walker, B.R.Haller// Turbomachinery—fluid dynamics and thermodynamics aspects computa-tional methods: 1st European conference.– 1995. - P. 157-179.
2. Дейч, М.Е. Гидрогазодинамика / М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 384 с.
3. Норри, Д. Введениевметодконечных элементов / Д. Норри, Ж.де Фриз. – М.: Мир, 1981. – 364 с.
4. Дроконов, А.М. Виброакустическая активность и эксплуатационная безопасность рабочих колес турбомашин: учеб. пособие / А.М. Дроконов, Т.А. Николаева. – Брянск: БГТУ, 2010. – 96 с.
5. Запись вебинара, освещающего возможностии принципы работы AutodeskSimulationCFD. – http://www.youtube.com/watch?v=nf0a5jNnpBc.
6. ОфициальнаясправкаAutodeskSimulationCFD. – http://wikihelp.autodesk.com/Simulation_CFD/enu/2013.

1. Singh,G. Developmentofthree-dimensionalstageviscoustimemarchingmethodfo-roptimization of short height stages /G.Singh, P.J.Walker, B.R.Haller// Turbomachinery—fluid dynamics and thermodynamics aspects computa-tional methods: 1st European conference.– 1995. - P. 157-179.
2. Deutsch, M.E. Hydrogasdynamics / M.E. Deutsch, A.E. Zaryankin. – M.: Energoatomizdat, 1984. – pp. 384.
3. Norry, D. Introduction into Finite Element Method / D. Norry, J. de Freeze. – M.: Mir, 1981. – pp. 364.
4. Drokonov, A.M. Vibroacoustic Activity and Operating Safety of Turbomachine Impellers: Manual/ A.M. Drokonov, T.A. Nikolayeva. – Bryansk: BSTU, 2010. – pp. 96.
5. Records of vebinar showing possibilities and principles of functioning AutodeskSimulationCFD. – http://www.youtube.com/watch?v=nf0a5jNnpBc.
6. Oficial information of AutodeskSimulationCFD. – http://wikihelp.autodesk.com/Simulation_CFD/enu/2013.

Статья поступила в редколлегию 29.12.2015.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Обозов А.А.

Сведения об авторах:

Тулубенский Евгений Викторович, аспирант БГТУ, кафедра «Тепловые двигатели», e-mail: evgen.tulubensky@gmail.com.
Дроконов Алексей Михайлович, к.т.н., профессор кафедры «Тепловые двигатели» БГТУ, e-mail: heat@tu-bryansk.ru.
Осипов Александр Вадимович, к.т.н., доцент кафедры «Тепловые двигатели» БГТУ, e-mail: heat@tu-bryansk.ru.

Tulubensky Eugeny Victorovich, Post graduate student of BSTU, Dep. “Heat Engines”, e-mail: evgen.tulubensky@gmail.com.
Drokonov Alexey Mikhailovich, Can.Eng., Prof. of the Dep. “Heat Engines” BSTU, e-mail: heat@tu-bryansk.ru.
Osipov Alexander Vadimovich, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Heat Engines”, BSTU, e-mail: heat@tu-bryansk.ru.

УДК 629.463.077-592-52
DOI: 10.12737/20249

В.В. Синицын, В.В. Кобищанов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ УНИФИЦИРОВАННОЙ ТОРМОЗНОЙ РЫЧАЖНОЙ ПЕРЕДАЧИ С ЦИЛИНДРАМИ ТЦР В ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМАХ ГРУЗОВЫХ ЧЕТЫРЕХОСНЫХ ВАГОНОВ

Определена возможность использования унифицированной рычажной передачи с цилиндром ТЦР-10-85 для вагонов с регулированием давления в цилиндрах при помощи авторежима, а также для вагонов без авторежима. Установлены ограничения по соотношениям тары и грузоподъемности для грузовых вагонов, эксплуатируемых в РФ, в которых возможно применение унифицированной тормозной системы.

Ключевые слова: рычажная передача, тормозной цилиндр, передаточное отношение, авторежим, гибкость рессорного подвешивания.

V.V. Sinitsyn, V.V. Kobishchanov

CONDITION DEFINITION FOR APPLICATION OF UNIFORM BRAKE RIGGING WITH CYLINDERS (BCR) IN BRAKE SYSTEMS OF FRIGHT EIGHT-WHEEL CARS

The application of BCR (brake cylinders with the built-in regulator of rod output manufactured by Transpneumatics Co.) in a brake actuator in fright eight-wheel cars with separate drives located in areas of car trucks is promising. Such a layout as is well known allows increasing fright car carrying capacity at the expense of an undercar area clearing. But the application of such systems for different types of cars is limited with design peculiarities of cars and a considerable scatter of reduction ratios.

The paper reports the consideration of a possibility for the location of a brake system with the BCR both in car truck areas, and on a car truck for a maximum possible quantity of car types. The limitations on the proportions of a lightweight and carrying capacity for fright cars operated in the RF in which the application of a uniform brake system is possible. The use of a cylinder in a brake system with the location on a car truck as a system least dependent on design peculiarities of cars is offered. The BCR-10-85 cylinder is chosen as one of the most possible variants of brake cylinders.

A possibility of the application of a uniform rigging with the BCR-10-85 cylinder for cars with pressure control in cylinders with the aid of an automated mode and application in a rigging of one or two holes for reduction ratio changes is defined. For cars having no possibility for pressure control in cylinders with the aid of an automated mode there is obtained a substantial quantity of reduction ratios depending on individual characteristics (lightweight and carrying capacity) of cars that does not allow using a uniform rigging.

Key words: rigging, brake cylinder, reduction ratio, auto-mode, spring hanger flexibility.

В настоящее время применение цилиндров ТЦР в исполнительном механизме тормоза грузовых четырехосных вагонов с раздельными приводами, размещаемыми в зонах тележек, является перспективным [1]. Такое расположение позволяет полностью освободить подвагонное пространство, соответственно появляется возможность увеличения полезного объема кузова вагона [2].

Применениетакой рычажной передачи для максимально возможного количества типов вагонов во многом ограничено определенным разбросом передаточных отношений рычажных передач, используемых в настоящее время на отечественных вагонах.

В соответствии с типовым расчетом [3] определим диапазоны передаточных отношений рычажной передачи с цилиндром ТЦР-10-85 (ТУ 24.05.382), в рамках которых можно использовать тормозную систему, исполнительный механизм которой расположен на двухосной тележке типа 2 с осевой нагрузкой 23,5 тс или на аналогичной ей тележке типа 3 с осевой нагрузкой 25 тс (ГОСТ 9246-2013) [4].

Учтем, что для вагонов с раздельным торможением и малогабаритными цилиндрами не предусмотрен норматив выхода штока для регулировки системы на чугунные колодки [3]. В связи с этим рассмотрим тормозную систему, оборудованную только композиционными колодками.

Для вагонов, имеющих массу брутто 100 тс и тару, приведенную в табл. 2.2 [3] (аналогичная табл. 10 [5] содержит более низкий верхний предел давления при учете юза), определим передаточные отношения. При этом найдем нижний предел при таре до 27 тс в соответствии с формулами типового расчета [3]. Определим минимально возможное передаточное отношение (при расчете эффективности тормоза) для вагона с массой брутто 100 тс (25 тс/ось). Это передаточное отношение будет максимальным при расчете на юз для вагона с минимально возможной тарой.

Определим $K_{p_{min}}$ при полной загрузке вагона, исходя из соотношения

$$[\delta_p] = \frac{mK_{p_{min}}}{Q},$$

где Q - масса брутто вагона (100 тс); $[\delta_p] = 0{,}14$.

$$K_{p_{min}} = 1{,}75 \text{ тс.}$$

Определим $K_{Д_{min}}$ – минимально возможное усилие на колодке в системе с композиционными тормозными колодками при максимальной загрузке вагона, для чего решим уравнение

$$K_{p_{min}} = 1{,}22 K_Д \frac{K_Д + 20}{4K_Д + 20}. \qquad (1)$$

$$K_{Д_{min}} = 1{,}79 \text{ тс.}$$

Определим n с учетом давления для расчета эффективности при максимальной загрузке. Также учтем отсутствие усилия сжатия пружины авторегулятора, приведенного к штоку (F_2), в системе с ТЦР.

$$K_Д = \frac{1}{1000m}\left(\frac{\pi d_ц^{\,2}}{4} p_ц \eta_ц - F_1\right) n\eta_n; \qquad (2)$$

$$n = 5{,}56.$$

С учетом полученного n и давления в цилиндрах для порожнего вагона при расчете на юз по формулам (2) и (1) найдем $K_{Д\min юз} = 0{,}87$ тс и $K_{p\min юз} = 0{,}943$ тс. При этом

$$\delta_p = \frac{mK_{p_{min\,юз}}}{T}.$$

В соответствии с формулой $\delta_p \varphi_{кр} \le [\psi_p]$ получим систему уравнений

$$[\psi_p] = \frac{mK_{p_{min\,юз}} \varphi_{кр}}{T}; \qquad (3)$$

$$[\psi_p] = \psi_{(q_0)} \psi_{(V)},$$

где $\psi_{(q_0)} = 0{,}17 - 0{,}0015(q_0 - 5)$; $q_0 = \frac{T}{4}$ – нагрузка на колесную пару (ось). (При этом следует учесть, что $q_0 \ge 5$ тс, т. е. вагон не может иметь тару менее 20 тс.)

Для ее решения найдем

$$\varphi_{кр_{20}} = 0{,}322;\ \varphi_{кр_{100}} = 0{,}257;\ \varphi_{кр_{120}} = 0{,}249;$$

$$\psi_{(20)} = 0{,}7829;\ \psi_{(100)} = 0{,}5638;\ \psi_{(120)} = 0{,}5447.$$

Решим систему (3) и выберем наибольшие значения: $[\psi_p]_{120} = 0{,}0946$; $T_{120} = 19{,}84$.

Согласно ГОСТ 9246-2013, минимальная масса (тара) вагона составляет 21 тс для тележек типов 2 и 3.

Таким образом, получим два диапазона передаточных отношений для вагонов, имеющих максимальную массу брутто 100 тс,которыеудовлетворяют всем уровням регулировок давления в цилиндрах: 5,55/5,7– для вагонов с тарой 21-27 тс и 5,55/6,1– для всех остальных.

Определим передаточные отношения для вагонов, имеющих массу брутто 94 тс (23,5 тс/ось) и тару, приведенную в табл. 2.2 [3]. Нижний предел при таре до 27 тс для грузовых вагонов с композиционными колодками, определенный согласно приведенному приему и ограничению ГОСТ 9246-2013, также составит 21 тс.

Таким образом, получим два диапазона передаточных отношений для вагонов, имеющих максимальную массу брутто 94 тс, которые удовлетворяют всем уровням регулировок давления в цилиндрах: 5,55/5,7–для вагонов с тарой 21-27 тс и 5,55/6,1– для всех остальных.

Таблица 1

Диапазоны передаточных отношений рычажной передачи с цилиндром ТЦР-10-85 при нормативных регулировках давлений в цилиндрах для вагонов, имеющих массу брутто 100 тс

Тара 21-27 тс; Р=1,3/1,6 кг/см^2		Тара 27-32 тс; Р=1,5/1,9 кг/см^2		Тара 32-36 тс; Р=1,8/2,2 кг/см^2		Тара 36-45 тс; Р=2,1/2,4 кг/см^2	
Нижний предел	Верхний предел	Нижний предел	Верхний предел	Нижний предел	Верхний предел	Нижний предел	Верхний предел
5,55/5,7	5,55/7,5	5,55/6,1	5,55/7,35	5,55/6,2	5,55/7,05	5,55/6,4	5,55/8,2

Примечание. В числителе приведены значения для эффективности тормоза, в знаменателе – для юза.

Таблица 2

Диапазоны передаточных отношений рычажной передачи с цилиндром ТЦР-10-85 при нормативных регулировках давлений в цилиндрах для вагонов, имеющих массу брутто 94 тс

Тара 21-27 тс; Р=1,3/1,6 кг/см^2		Тара 27-32 тс; Р=1,5/1,9 кг/см^2		Тара 32-36 тс; Р=1,8/2,2 кг/см^2		Тара 36-45 тс; Р=2,1/2,4 кг/см^2	
Нижний предел	Верхний предел	Нижний предел	Верхний предел	Нижний предел	Верхний предел	Нижний предел	Верхний предел
5,15/5,7	5,5/7,5	5,15/6,1	5,55/7,35	5,15/6,2	5,15/7,05	5,15/6,4	5,5/8,2

Примечание. В числителе приведены значения для эффективности тормоза, в знаменателе – для юза.

В общем случае для вагонов, имеющих максимальную тару в диапазоне 10-45 тс и брутто 94 или 100 тс, получим два диапазона передаточных отношений: 5,55/5,7– для вагонов с тарой 21-27 тс и 5,55/6,1– для всех остальных.Диапазон передаточных отношений 5,55/5,7 будет удовлетворять всем ограничениям для грузовых четырехосных вагонов с цилиндром ТЦР-10-85.

Определим пределы возможного использования автоматического регулирования давления в цилиндрах.

Возможность применения авторежима на вагонах можно определить в соответствии с графиком [6]. На рисунке показаны величины минимально возможных прогибов подвешивания вагонов под полезной нагрузкой. При меньших прогибах, но полной загрузке вагона величина давления будет ниже 0,3 МПа.Следует отметить, что на основании приведенного графика при давлении ниже 0,3 МПа получаем достаточную эффективность тормоза и отсутствие юза. Однако этот вопрос в нормативной документации в настоящее время не отражен. Это обстоятельство может явиться одним из оснований для применения однорежимного тормоза (наряду с необходимостью установки авторежима (авторежимов) и опорных балоки их обслуживания).

Как показывает практика,такие вагоны эксплуатируются как с авторежимом, так и без[7]. При полной загрузке давление авторежима может быть менее 0,3 МПа.

Таким свойством обладают, в частности, вагоны для перевозки автомобилей. Допускается, по согласованию с заказчиком и ОАО «РЖД», ограничиваться переключаемыми вручную режимами загрузки для вагонов, полная расчетная загрузка которых не превышает 70% веса тары [3]. Расчеты тормоза некоторых типов вагонов при этом показывают возможность юза в груженом состоянии вагона при полной расчетной загрузке. В этих случаях очевидны преимущества однорежимного тормоза.

Применение однорежимного тормоза также имеет ограничения. Согласно проведенным расчетам, таким ограничением является отношение тары к грузоподъемности ~0,8 (грузоподъемность не должна превышать 125% от тары). С меньшим или равным этому соотношениемможно получить стабильное передаточное число,

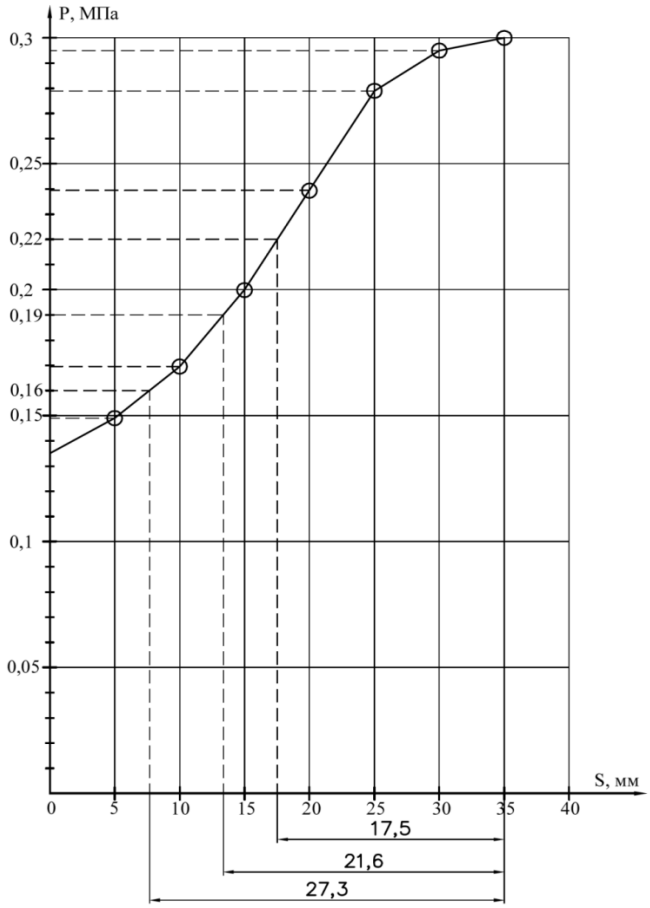


Рис. Зависимость выходного давления авторежима 265А-4 от прогиба рессорного комплекта вагона [6] и величины минимально возможных прогибов при регулировке давления в зависимости от величины тары

удовлетворяющее нормативным требованиям. С большей грузоподъемностью при минимально возможном передаточном отношении рычажной передачи получаем возможность юза.

Например, минимальная грузоподъемность вагонов надвухосных тележках типа 2 (ГОСТ 9246-2013) с гибкостью рессорного комплекта $\lambda=1{,}29\cdot10^4$ мм/Н (1,29 мм/тс): при таре до 27 тс – не менее 54,3 тс (201,1 % от тары); от 27 до 32 тс – не менее 42,3 тс (132,2 % от тары); от 32 до 36 тс – не менее 33,5 тс (93,1% от тары); от 36 до 45 тс – не менее 21,1 тс (46,9 % от тары).

У вагонов, имеющих на кузове трафарет «Однорежимный», оборудованных композиционными колодками,воздухораспределители должны быть включены на средний режим[8].Максимальные передаточные числа, согласно приведенному соотношению, для вагонов с тарой от 21 до 45 тс (с учетом максимальной массы брутто 100 тс) будут изменяться соответственно от 2,35 до 5,55.

Таким образом, мы получаем индивидуальные значения передаточных отношений для каждого вагона с однорежимным тормозом.Кроме того, в этом случае будет получено значительное количество передаточных отношений, зависящих от индивидуальных особенностей каждого вагона.

Итак, определенавозможность применения унифицированной рычажной передачи с цилиндром ТЦР для вагонов с регулированием давления в цилиндрах при помощи авторежима (табл. 1, 2). При этомдолжен использоватьсядиапазон передаточных отношений 5,55/5,7. Также допустимо использовать в рычажной передаче два отверстия для изменения передаточных отношений с диапазонами: 5,55/5,7 – для вагонов с тарой 21-27 тс и 5,55/6,1 – для всех остальных.

Для вагонов, имеющихповышенный коэффициент тары и не имеющих возможности регулирования давления в цилиндрах с помощью авторежима(однорежимных),существуетзначительное количество передаточных отношений, зависящих от индивидуальных характери-

стик (тары и грузоподъемности) вагонов, что не позволяет использовать унифицированную рычажную передачу (в том числе с цилиндром ТЦР).

В нормативной документации необходимо отразить возможное применение тормоза при недостаточном прогибе рессорного комплекта для получения нормативного значения 0,3 МПа у вагонов с полной загрузкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батенков, В.А. Задача на будущее – создать конкурентоспособную продукцию /В.А. Батенков //Евразия Вести. – 2010. – Вып. 5. – С. 12-13.
2. Никитин, Г.Б. Новое в развитии автотормозной техники/ Г.Б. Никитин, А.В. Казаринов, И.В. Назаров//Железнодорожный транспорт. – 2008. – Вып. 4. – С. 62-64.
3. Технические требования к тормозному оборудованию грузовых вагонов постройки заводов РФ. Типовой расчет тормоза грузовых и рефрижераторных вагонов. – М.: МПС РФ, 1996. – 77 с.
4. ГОСТ 9246-2013. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 42 с.
5. Общее руководство по ремонту тормозного оборудования вагонов 732-ЦВ-ЦЛ/ПКБ ЦВ ОАО «РЖД».– 2011. – 198 с.
6. Сипягин, Е.С. Авторежим 265А-4 повышает межремонтный пробег/Е.С. Сипягин//Вагоны и вагонное хозяйство. – 2009. – Вып. 2. – С. 32-34.
7. Синицын, В.В. Учет особенностей грузовых вагонов с повышенным коэффициентом тары при проектировании тормозных систем/В.В. Синицын, К.В. Герасимов//Тяжелое машиностроение. – 2013. – Вып. 9. – С. 26-27.
8. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состав: утв. Советом по железнодорожномутранспорту государств – участников Содружества: протокол от 6-7 мая 2014 г. № 60. – 2014. – 181 с.

1. Batenkov, V.A. Task for future – to create a competitive product /V.A. Batenkov //Eurasia News. – 2010. – Issue 5. – pp. 12-13.
2. Nikitin, G.B. Modern in development of auto-brake equipment/ G.B. Nikitin, A.V. Kazarinov, I.V. Nazarov//Railway Transport. – 2008. – Issue 4. –pp. 62-64.
3. Engineering Requirements to Brake Equipment of Freight Cars Produced by Plants of Russia. Routine Calculation of Brake for Fright and Refrigerator Cars. – M.: MR RF, 1996. – pp.77.
4. SARS 9246-2013. Four-Wheel Three-Piece Car Trucks of Freight Cars for Railways with 1520 mm Gauge. General Specifications. – M.: Standardinform, 2014. – pp. 42.
5. General Repair Manual for Brake Equipment of Cars 732-ЦВ-ЦЛ/ПКБ ЦВ “RRW” Co.– 2011. – pp. 198.
6. Sipyagin, E.S. Auto-mode 265A-4 increases turnaround time/E.S. Sipyagin//Cars and Wagon Depot. – 2009. – Issue 2. – pp. 32-34.
7. Sinitsyn, V.V. Peculiarities Account of freight cars with increased lightweight rate at brake system designing/V.V. Sinitsyn, K.V. Gerasimov//Heavy Engineering. – 2013. – Issue 9. – pp. 26-27.
8. Maintenance Regulations for Brake Equipment and Brake Control of Rolling Stock: Approved by Council of Railway Transport of States-Participants of the Commonwealth: Protocol of May 6-7, 2014. № 60. – 2014. – pp. 181.

Статья поступила в редколлегию 15.01.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Сокало В.И.

Сведения об авторах:

Синицын Владимир Владимирович, к. т. н., ведущий инженер-конструктор АО «УК «БМЗ», тел.: 8(905) 188-35-31, e-mail: universal-masch@yandex.ru.

Кобищанов Владимир Владимирович, д. т. н., профессор кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: wagon@tu-bryansk.ru.

Sinitsyn Vladimir Vladimirovich, Can.Eng., Leading Design Engineer, BMP” Co, Phone: 8(905) 188-35-31, e-mail: universalmasch@yandex.ru.

Kobishchanov Vladimir Vladimirovich, D.Eng., Prof of the Dep. “Rolling Stock” Bryansk State Technical University, e-mail: wagon@tu-bryansk.ru.

УДК 629.4.027.3
DOI: 10.12737/20250

Е.В. Сливинский, С.Ю. Радин, Т.Е. Митина

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЯ АДАПТИВНОЙ ТОРСИОННОЙ РЕССОРЫ ДЛЯ РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ТРЁХОСНЫХ ТЕЛЕЖЕК ТЕПЛОВОЗОВ

Представлены материалы, касающиеся разработки перспективной конструкции адаптивного торсионного подвешивания для тепловозов. Разработка рекомендуется научно-исследовательским и промышленным структурам в области тяжёлого машиностроения как в нашей стране, так и за рубежом с целью ее дальнейшего изучения и возможного внедрения в практику.

Ключевые слова: адаптивная торсионная рессора, колебания, рессорное подвешивание.

E.V. Slivensky, S.Yu. Radin, T.E. Mitina

ROD OSCILLATION INVESTIGATION OF ADAPTIVE TORSION SPRING FOR SPRING SUSPENSION OF SIX-WHEEL LOCOMOTIVE BOGIES

In modern locomotive design to reduce a dynamic effect upon a track there are widely used jaw and lawless six-wheel bogies supplied with a spring suspension using laminated springs, cylindrical spiral springs of compression and pneumatic springs. A considerable drawback of all known designs of spring suspension for rolling-stock is that all of them apart from a pneumatic one have no possibility for self-regulation in an automatic mode of their rigid characteristics depending on external dynamic impacts of track unevenness upon the latter. There is developed in Bunin State University of Yelets a promising invention-leveled structure of an adaptive torsion spring suspension excluding such a drawback and a number of computations was carried out for the substantiation its rational design values.

Key words: adaptive torsion spring, oscillations, spring hanger.

Введение

В конструкциях современных локомотивов для уменьшения динамического воздействия на путь широко применяются челюстные и бесчелюстные трёхосные тележки, снабжённые рессорным подвешиванием, в котором используются как листовые рессоры, так и винтовые пружины сжатия [1]. Так, рессорное подвешивание тепловоза ТЭП60 представляет собой упругую связь, расположенную между его рамой и колёсными парами, и выполнено в виде двух ступеней. Первая ступень представляет собой упругую связь между рамой тележки и буксами пружин и листовых рессор, а вторая ступень включает в себя маятниковые опоры с пружинами, воспринимающими нагрузку от главной рамы тепловоза через шаровые опоры. Несмотря на свою эффективность использования, такое рессорное подвешивание является довольно сложным, металлоемким и при эксплуатации требует значительных затрат на ремонт и профилактику. Широкое же распространение листовых рессор в конструкциях рессорного подвешивания грузовых локомотивов обусловлено тем, что они эффективно гасят возникающие от неровности пути и колес колебания. Это происходит за счет создания значительных по величине сил трения между смежными листами рессор. Однако по мере высыхания смазки между листами и появления коррозии значительно снижается чувствительность листовых рессор к восприятию динамических нагрузок, а это значит, что они начинают работать только при высоких скоростях движения локомотивов. Известна также бесчелюстная тележка тепловоза 2ТЭ10М, в которой в качестве рессорного подвешивания использованы комплекты цилиндрических винтовых пружин сжатия. В современных схемах рессорного подвешивания локомотивов имеется возможность отказаться от листовых рессор,

пружин и устройств для гашения колебаний - гидравлических, фрикционных и резиновых демпферов.

Одним из перспективных технических решений, используемых в рессорном подвешивании локомотивов, являются торсионные рессоры. Они представляют собой стержень круглого или квадратного сечения, один конец которого закреплен во втулке, установленной на раме тележки, а другой жестко связан с рычагом, который соединен с обрессоренной частью экипажа, например с кузовом. Второй опорой стержня служит подшипник, также закрепленный на раме тележки. В отличие от пружин и листовых рессор торсион испытывает деформацию чистого кручения, поэтому материал, из которого он изготовлен, используется намного лучше, чем в указанных упругих элементах рессорного подвешивания.

При проектировании рессорного подвешивания локомотивов выполняют расчет как листовых рессор, так и витых рессор (пружин) на прочность и жесткость с помощью широко известных методов сопротивления материалов и расчёта деталей машин. Расчет же торсионных рессор проводят с проверкой условия прочности по формуле [2]

$$\tau = \frac{16M_{кр}}{\pi d^3} = 16\frac{Na}{\pi d^3} \le [\tau] \ ,$$

где N – усилие, приложенное к рычагу торсиона; a – длина рычага торсиона.

При этом угол закручивания вычисляют по зависимости [2]

$$\gamma = \frac{Ndl}{I_\rho G},$$

где I_ρ – полярный момент инерции сечения стержня торсиона ($0{,}1d^4$ см^4); G – модуль сдвига ($8\cdot 10^4$ МПа).

Прогиб точки приложения силы N и жесткость торсиона определяют по зависимостям [2]

$$\Delta = \gamma d = \frac{Nd^2 l}{I_\rho G} \quad \text{и} \quad Ж = \frac{N}{\Delta} = \frac{I_\rho G}{ld^2}.$$

Из представленных формул видно, что важным расчетным параметром является величина рабочей нагрузки, приложенной к рессорным комплектам. Такие нагрузки возникают в динамике, и рессоры поглощают часть энергии толчков, вызываемых неровностями пути, постепенно превращая эту энергию в энергию колебаний надрессорного строения. Эти колебания сопровождаются непрерывным рассеванием энергии за счет трения между листами рессор, трения в гасителях колебаний и других внутренних сопротивлений, что приводит к быстрому затуханию колебаний и устраняет опасность перехода через резонансные области. Основными видами колебаний являются подпрыгивание, галопирование и боковая качка рельсовых экипажей.

Существенным недостатком известных конструкций рессорного подвешивания локомотивов является то, что все они, кроме пневматического, не имеют возможности саморегулирования в автоматическом режиме своих жесткостных характеристик в зависимости от внешних динамических воздействий неровности пути на последние.

1. Описание конструкции и работы перспективного рессорного подвешивания

В течение ряда лет в СКБ ЕГУ им. И.А. Бунина по заказу Управления ЮВЖД (филиала ОАО «РЖД») проводилась НИР на тему «Разработка практических рекомендаций по нововведению надежности, технико-экономических, технологических и эксплуатационных показателей при эксплуатации и ремонте подвижного состава и другого оборудования, используемого на Юго-Восточной железной дороге». Одному из ее разделов посвящены исследования, связанные с упрощением конструкции и повышением эффективности использования рессорного подвешивания локомотивов и вагонов.

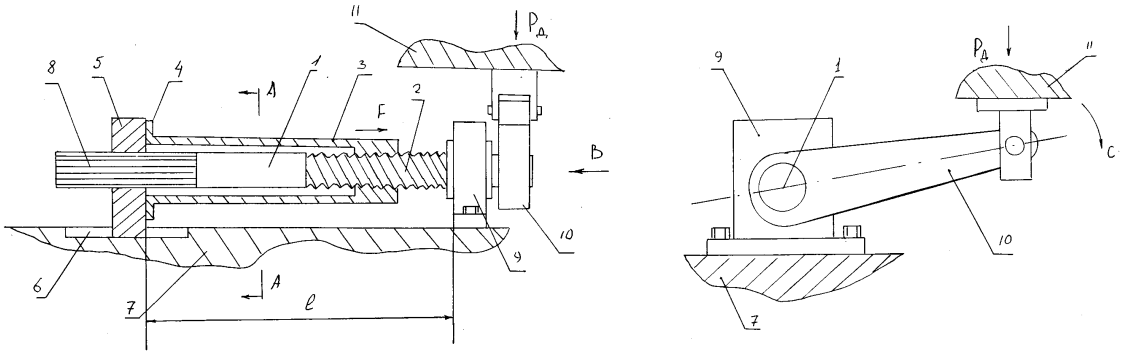


Рис.1. Адаптивная торсионная рессора (RU2317214)

На рис.1 показана адаптивная торсионная рессора (RU2317214), состоящая из стержня 1, на котором нарезана длинноходовая резьба 2, контактирующая с ответной, выполненной на внутренней поверхности пустотелого бруса 3. Конец пустотелого бруса снабжен фланцем 4, жестко присоединенным к подвижной опоре 5, которая размещена в пазу 6 тележки локомотива 7. Стержень 1 также снабжен шлицами 8, взаимосвязанными с ответными, выполненными в подвижной опоре 5. Другой конец стержня 1 размещен в неподвижной опоре 9 и снабжен рычагом 10, шарнирно закрепленным на кузове локомотива 11.

Работа торсиона происходит следующим образом. При колебаниях кузова промышленного локомотива 11 динамические нагрузки $P_д$ воспринимаются рычагом 10, который получает, например, угловой поворот по стрелке *C*, что способствует повороту в эту же сторону стержня 1 торсиона. Так как стержень 1 торсиона снабжен длиноходовой резьбой 2, взаимосвязанной с ответной, выполненной на пустотелом брусе 3, то последний переместится по стрелке *F*, увлекая за собой в этом же направлении подвижную опору 5, которая, проскальзывая по шлицам 8 стержня 1 торсиона, уменьшит его рабочую длину *L* до новой рабочей длины L_1. Уменьшение рабочей длины *L* стержня 1 торсиона будет способствовать увеличению его жесткости, что подтверждается известной зависимостью $K_\varphi = \frac{GI_\rho}{Ld^2}$. Увеличение жесткости обеспечит эффективное демпфирование перемещения кузова локомотива 11 в этом направлении, что позволит снизить динамические нагрузки, передаваемые на узлы экипажной части локомотива, и повысит его плавность хода. После исчезновения усилия $P_д$ стержень 1 торсиона под действием сил упругого сопротивления возвращается в исходное положение (совместно с кузовом локомотива 11) и его рабочая длина *L* достигает первоначального значения. Далее описанные процессы могут повторяться неоднократно.

В ряде случаев параметры механической системы, такой как адаптивный торсион, выполненный по патенту RU2317214 (например крутильная жесткость), не остаются неизменными, а являются некоторой заданной функцией времени, чаще периодической [3; 4]. Если нарушить состояние равновесия такой системы, то будут происходить своеобразные колебания. С одной стороны, их нельзя назвать свободными, так как система испытывает определенное внешнее воздействие (в виде изменения крутильной жесткости стержня торсиона), а с другой - они не являются вынужденными, так как внешнее воздействие не проявляется в виде заданной возмущающей силы. Такие колебания называются параметрическими. В зависимости от свойств системы и характера изменения ее параметров они могут иметь ограниченные или возрастающие амплитуды, причем во втором случае возможно наступление параметрического резонанса.

2. Расчёт основных параметров предложенной конструкции рессоры

Рассмотрим расчётную схему торсиона (рис. 2), представляющую собой упругий стержень 1, расположенный в направляющей неподвижной втулке 2, к которому приложен крутящий момент *T*. Свобода углового поворота упругого стержня 1 ограничена подвижной в продольной плоскости стержня 1 шлицевой втулкой 3, удаленной от нижнего конца стержня на расстояние *l*.

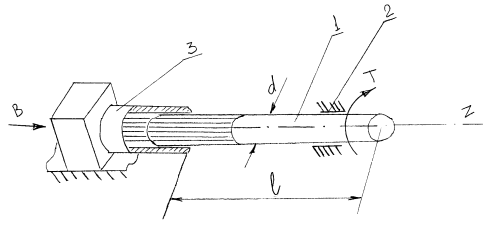


Рис. 2. Расчётная схема торсиона

Составим уравнение свободных колебаний упругого стержня 1, считая, что они происходят в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа. Если в текущий момент времени *t* угловой поворот упругого стержня 1 составляет φ, то восстанавливающая сила упругости стержня равна $K_\varphi\varphi$, а уравнение его движения имеет вид

$$-K_\varphi\varphi = J_m\ddot{\varphi},$$

где K_φ – коэффициент крутильной жесткости системы; J_m – момент инерции стержня.

Шлицевая втулка 3 при ее достаточной длине обеспечивает практически полное защемление упругого стержня 1, и тогда $K_\varphi = \frac{GJ_\rho}{ld^2}$. Предположим, что упругий стержень 1 имеет постоянное поперечное сечение с осевым моментом инерции *J*. Таким образом, дифференциальное уравнение угловых поворотов упругого стержня 1 запишется в виде [5; 6]

$$\ddot{\varphi} + \frac{GJ_\rho}{J_m l d^2}\varphi = 0. \qquad (1)$$

Если расстояние *l* постоянно, то уравнение (1) описывает свободные колебания стержня около среднего положения с собственной частотой

$$\omega_c = \sqrt{\frac{GJ_\rho}{J_m l d^2}}.$$

Теперь предположим, что шлицевая втулка 3 скользит вдоль упругого стержня 1 по заданному закону

$$z = A\cos\omega t,$$

т.е. упругий стержень 1 совершает около среднего положения *l* гармонические колебания с амплитудой *A* и круговой частотой ω. В этом случае коэффициент жесткости оказывается функцией времени и его можно записать в виде

$$K_\varphi = \frac{GJ_\rho}{J_m(l+z)d^2} = \frac{GJ_\rho}{J_m(l+A\cos\omega t)d^2}.$$

Тогда дифференциальное уравнение (1) становится уравнением с переменными коэффициентами

$$\ddot{\varphi} + \frac{GJ_\rho}{J_m(l+A\cos\omega t)d^2}\varphi = 0, \qquad (2)$$

что характерно для системы с параметрическим возбуждением колебаний.

В практике существует значительное число других механических систем, подверженных параметрическому возбуждению. Ряд примеров убеждает, что в большинстве практически важных случаев дифференциальное уравнение параметрических колебаний можно привести к стандартной форме [4]

$$\frac{d^2\varphi}{d\tau^2} + (a - 2q\cos 2\tau)\varphi = 0, \qquad (3)$$

где *a* и *q* - некоторые постоянные.

Вернёмся к механической системе, показанной на рис. 2. Предположим, что амплитуда колебаний втулки *A* весьма мала. В этом случае дифференциальное уравнение (2) примет вид

$$\ddot{\varphi} + \frac{GJ_\rho}{J_m l d^2}\left(1 - \frac{A}{l d^2} cos\omega t\right)\varphi = 0. \quad (4)$$

Перейдем к безразмерному времени $\tau : 2\tau = \omega t$.

Тогда

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{\omega^2}{4}\frac{d^2\varphi}{d\tau^2} .$$

В итоге дифференциальное уравнение (4) приобретает стандартную форму (3), которую можно получить в окончательном виде (5) в следующей последовательности:

$$\frac{\omega^2}{4}\frac{d^2\varphi}{d\tau^2} = -\frac{GJ_\rho}{J_m l d^2}\left(1 - \frac{A}{l d^2} cos 2\tau\right)\varphi = 0;$$

$$\frac{d^2\varphi}{d\tau^2} = -\frac{GJ_\rho}{J_m l d^2}\frac{4}{\omega^2}\left(1 - \frac{A}{l d^2} cos 2\tau\right)\varphi = 0;$$

$$\frac{d^2\varphi}{d\tau^2} + \left(\frac{4GJ_\rho}{J_m l d^2\omega^2} - \frac{4GJ_\rho A}{J_m l^2 d^4\omega^2} cos 2\tau\right)\varphi = 0.$$

При этом видно, что входящие в него коэффициенты a и q соответственно будут равны

$$a = \frac{4GJ_p}{J_m l d^2\omega^2} \quad \text{и} \quad q = \frac{2GJ_p A}{J_m l^2 d^4\omega^2}.$$

Основное уравнение параметрических колебаний (3), называемое *уравнением Матье*, и его решение описывают колебания рассматриваемого нами упругого стержня 1 (рис. 2), характер которых главным образом зависит от конкретных значений параметров a и q.

Значения параметров a и q в одном случае соответствуют колебаниям, ограниченным по амплитуде, а в другом - колебаниям с возрастающими амплитудами, способствующими возникновению резонанса упомянутого упругого стержня 1. Поэтому основную практическую важность предлагаемой конструкции торсиона представляет именно тенденция колебательного процесса, заключающаяся в следующем: если амплитуды остаются ограниченными, то система *устойчива*, в противном же случае имеет место параметрический резонанс, т.е. система *неустойчива*.

Для практических целей наибольшее значение имеют границы между областями устойчивых и неустойчивых решений. Этот вопрос хорошо исследован, причем окончательные результаты представляются в виде диаграммы, построенной в плоскости параметров a и q, которая называется *диаграммой Айнса-Стретта* [3; 4].

Каждой системе, характеризуемой параметрами a и q, соответствует точка с координатами (a, q) на диаграмме Айнса-Стретта (изображающая точка). Если изображающая точка находится в пределах белых полей диаграммы, то система устойчива; неустойчивым системам соответствуют изображающие точки, расположенные на заштрихованных полях.

Для проведения численного расчёта указанных характеристик применительно к тепловозу ТЭП60, у которого в рессорном подвешивании может быть реализовано техническое решение, описанное в патенте RU2317214, использован ряд известных параметров, входящих в соответствующие формулы: статическая нагрузка, приложенная к рычагу торсиона, N_{CT} = 53 кН; динамическая нагрузка, приложенная к рычагу торсиона, N_∂ =13,25 кН; суммарная нагрузка на торсион $N_\Sigma = N_{CT} + N_\partial$ = 66,25 кН; момент, приложенный к стержню торсиона, $M_{кр} = N_\Sigma\, l_1$ = 19,8 кН·м; длина приводного рычага торсиона l_1 = 300 мм; длина рабочей части стержня торсиона l = 600 мм; изменение рабочей длины стержня торсиона Δl = 0 – 40 мм; материал стержня торсиона - сталь 65С2ВА (ГОСТ 14959-79); модуль упругости материала $G = 8\cdot10^4$ МПа; диаметр стержня торсиона - 60,0 мм; полярный момент инерции стержня торсиона J_ρ = 129,6 см^4; массовый момент инерции стержня J_m = 108 кг·мм·с^2; круговая частота колебаний стержня ω = 10 – 35 рад/с; угол закручивания стержня торсиона φ = 8 – 17^0 (при N_{CT} - 8^0, а при N_∂ -17^0); амплитуда продольных колебаний стержня торсиона A = 10 – 60 мм.

Вычислительный эксперимент выполнен в системе Matlab 6.5. Следует отметить, что уравнение Матье не имеет точного аналитического решения, а приближенное его решение можно получить, например, методом Хилла [5] или одним из численных методов.

С учётом изложенного решим уравнение Матье (3) с использованием солвера ode45, который основан на методе Рунге-

Кутта четвертого и пятого порядков точности. Входными аргументами солвера являются: имя файл-функции в апострофах, вектор с начальным и конечным значениями времени наблюдения за колебаниями и вектор начальных условий. Выходных аргументов два: вектор значений времени и матрица значений неизвестных функций. Значения функций расположены по столбцам матрицы: в первом столбце – значение самой функции, во втором – значение ее первой производной.

Схема нахождения численного решения состоит из следующих этапов:

1. Приведение дифференциального уравнения к системе дифференциальных уравнений первого порядка. Для уравнения Матье (3) была получена система

$$\begin{cases} \varphi_1' = \varphi_2; \\ \varphi_2' = -\varphi_1\left(a - 2q\cos 2\tau\right) \end{cases}$$

при начальных условиях $\varphi(0) = 0{,}08;\ \ \varphi'(0) = 0.$

2. Написание специальной файл-функции для полученной системы уравнений. Файл-функция для уравнения (3) equation_Fi представлена на рис. 3.

3. Вызов солвера ode45.

4. Визуализация полученного результата.

С помощью этой же файл-функции были получены значения параметров *a* и *q* уравнения Матье. А так как система исследуется при различных значениях амплитуды *A* и частоты *ω*, то необходимо провести анализ возможных значений параметров *a* и *q*.

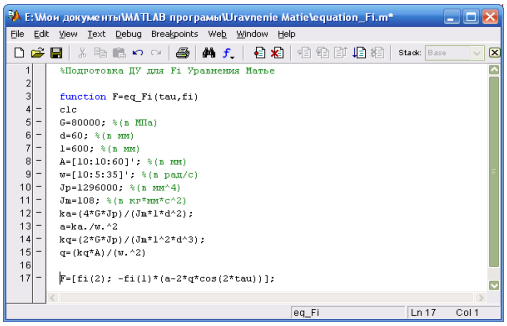


Рис. 3. Файл-функция equation_Fi

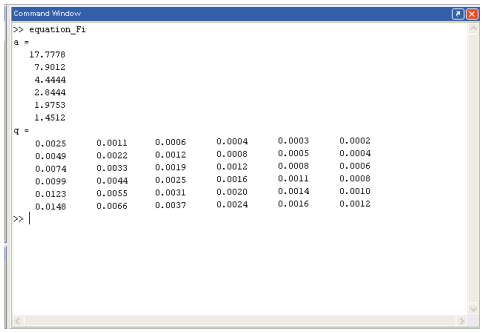


Рис. 4. Результаты расчёта

Результаты расчета представлены на рис. 4, из которого видно, что все значения параметра *q* слабо отличаются друг от друга. Следовательно, точки с координатами (*a*, *q*) будут приближены к оси абсцисс на диаграмме Айнса-Стретта. Поэтому для различных значений параметра *a* было взято одно из значений параметра *q*. Точки с полученными координатами были отмечены на диаграмме (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что все точки лежат в белых областях диаграммы, следовательно, система устойчива для всех значений. Однако на диаграмме не указана точка со значением параметра *a* = 17,7778. Известно, что около значений $a = \frac{k^2}{4}$ (при *k* = 1, 2, 3…) наступает параметрический резонанс, т.е. положение равновесия системы становится неустойчивым. Таким образом, система перейдет в неустойчивое состояние вблизи точек с ординатой *q* = 0 и абсциссами

$$a = \frac{1}{4};\ 1;\ \frac{9}{4};\ 4;\ \frac{25}{4};\ 9;\ \frac{49}{4} \cong 12{,}25;\ 16;\ \frac{81}{4} \cong 20{,}25...$$

Отсюда следует, что при коэффициенте *a* = 17,7778 система будет также устойчива.

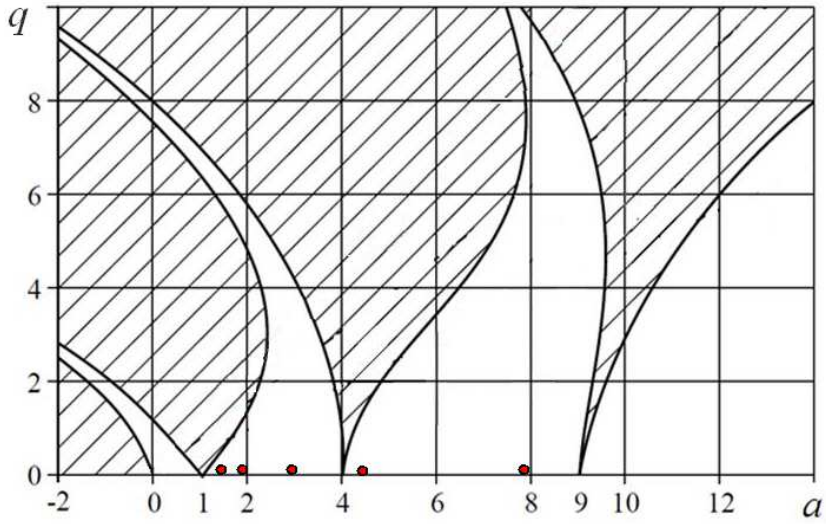


Рис. 5. Диаграмма Айнса-Стретта

Диаграмма Айнса-Стретта полностью освобождает от выполнения каких-либо операций по решению уравнения Матье [5]. Достаточно составить это уравнение, т.е. найти значения параметров системы a и q, после чего диаграмма даст ответ на вопрос об устойчивости или неустойчивости системы. Видно, что рассмотренная конструкция устойчива.

В качестве примера выполним численное решение уравнения Матье, что позволит дать картину возможного проявления резонанса в рассматриваемой колебательной системе. Вызов солвера и построение графика осуществляются в функции solv_Fi.m (рис. 6). По результатам решения уравнения Матье были построены графики, позволяющие установить резонансную область работы торсиона, а следовательно, дать оценку его безаварийной работоспособности.

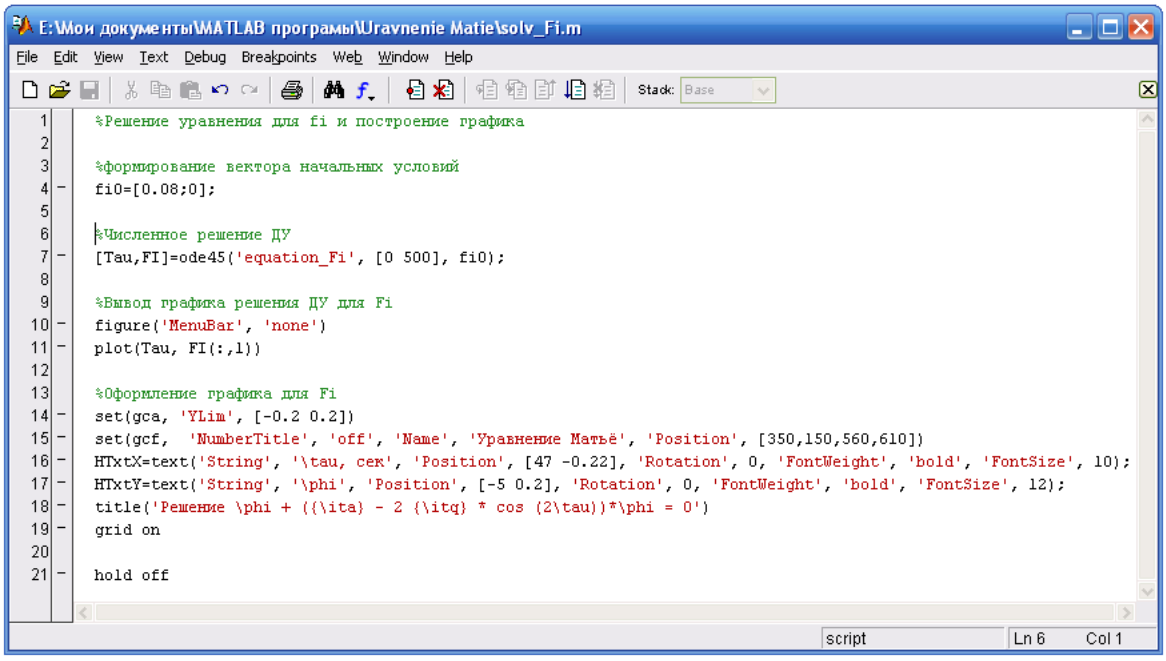


Рис. 6. Функция solv_Fi.m

На рис. 7 приведён один из графиков, построенный для характерных условий работы торсиона (при A = 60 мм и частоты ω = 35 рад/с), показывающий изменение угловых колебаний стержня торсиона в зависимости от времени его нагружения ($\varphi = f(\tau)$).

Анализ значительного числа полученных графиков, и в частности показанного в качестве примера на рис. 7, позволил установить, что вход стержня торсиона в резонансный режим работы не происходит, что свидетельствует о его надёжности в эксплуатационных условиях. При этом численное значение угла поворота стержня торсиона для рассматриваемого примера остается постоянным, равным φ = 0,08 рад, и не характеризуется областью перехода в резонанс.

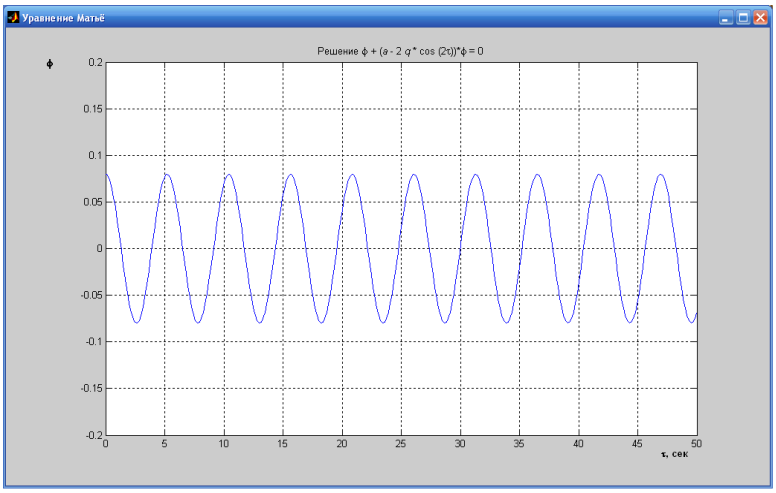


Рис. 7. Пример построения графика для характерных условий работы торсиона

Заключение

Результаты исследования рекомендуются к использованию отраслевым НИИ тяжёлой промышленности, выпускающей локомотивы, а также конструкторским подразделениям предприятий, серийно изготовляющих, ремонтирующих и эксплуатирующих магистральные и промышленные тепловозы, как в нашей стране, так и за рубежом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железнодорожный транспорт: энциклопедия/ гл. ред. Н. С. Конарев. – М.: Больш. Рос. энцикл., 1994. – 559 с.
2. Орлов, П.И. Основы конструирования: в 2 кн. / П.И. Орлов. - М.: Машиностроение, 1988.-Кн. 2.-544 с.
3. Mathieu, Emile. Cours de physique mathematique/ Emile Mathieu. - Paris, Gauthier-Villars, 1873.
4. Стретт, М. Д. О. Функции Ламе, Матье и родственные им в физике и технике: [пер. с нем.] / М.Д. О. Стретт. - Харьков; Киев, 1935.
5. Мак-Лахлан, Н.В. Теория и приложения функций Матье/ Н.В. Мак-Лахлан. – М.: Изд-во иностр. лит., 1953. – 475 с.
6. Камке, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям: [пер. с нем.] / Э. Камке. – 5-е изд. - М., 1976.
7. Якубович, В. А. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения/ В.А. Якубович, В.М. Старжинский. - М., 1972.

1. Railway Transport: Encyclopedia/ Editor-in-Chief N.S. Konarev. – M.: Great Russian Encyclopedia, 1994. – pp. 559.
2. Orlov, P.I. Design Fundamentals: in 2 Vol. / P.I. Orlov. - M.: Mechanical Engineering, 1988.-Vol. 2.- pp. 544.
3. Mathieu, Emile. Cours de physique mathematique/ Emile Mathieu. - Paris, Gauthier-Villars, 1873.
4. Strett, M.D. On Lame, Mathieu Functions and Related Them in Physics and Techniques; [transl. from Germ.] / M.D. Strett. - Kharkov; Kiev, 1935.
5. MacLahlan, N.V. Theory and Applications of Mathieu Functions/ N.V. MacLahlan. – M.: Publishing House of Foreign Literature, 1953. – pp. 475.
6. Kamke, E. Reference Book on Common Differential Equations; [transl. from Germ.] / E. Kamke. - 5 Edition. - M., 1976.

7. Yakubovich, V.A. Linear Differential Equations with Periodic Coefficients and Their Applications/ V.A. Yakubovich, V.M. Starzhinsky. - M., 1972.

Статья поступила в редколлегию 18.01.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Петров Г.И.

Сведения об авторах:

Сливинский Евгений Васильевич, д.т.н., профессор кафедры «Механика и технологические процессы» Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина, тел.: 8-920-246-86-81.
Радин Сергей Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры «Механика и технологические процессы» Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина, тел.: 8-910-251-36-55.
Митина Татьяна Евгеньевна, соискатель Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина, тел.: +7 (47467) 4-25-75.

Slivinsky Yevgeny Vasilievich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Mechanics and Technological rocesses” Bunin State University of Yelets Phone: 8-920-246-86-81.
Radin Sergey Yurievich, Can.Eng**.,** Assistant Prof. of the Dep. “Mechanics and Technological Processes” Bunin State University of Yelets, Phone: 8-910-251-36-55.
Mitina Tatiana Yevgenievna, Competitor Bunin State University of Yelets, Phone: +7 (47467) 4-25-75.

УДК 621.83
DOI: 10.12737/20251

В.П. Тихомиров, А.Г. Стриженок

МЕТОДИКА ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

Предложена методика выбора материала из низкоуглеродистых легированных сталей для изготовления зубчатых колес осевых редукторов тепловозов 2ТЭ25А, ТЭМ18.

Ключевые слова: сталь, цементация, физико-механические характеристики, цилиндрические зубчатые колеса, износостойкость, долговечность.

V.P. Tikhomirov, A.G. Strizhenok

METHODS OF MATERIAL CHOICE FOR COG-WHEELS

The method for material choice of low-carbon alloyed steel for manufacturing cog-wheels of axial reduction gear of locomotives of 2TE25A, TEM 18 is considered. The method allows choosing the best material for cog-wheels taking into account basic physical stress-strain and tribological characteristics and operation conditions. The material choice is carried out on the basis of three criteria: value, strength, and wear-resistance for three kinds of steel. The procedure of material choice provides for the definition of the priority on every criterion. As an illustration there is shown an example. A priority and a relative priority of materials compared one after another on every criterion of optimization are defined. With that end in view square matrices of connectivity are used. On the basis of data presented in the connectivity matrix there is defined a complex relative priority of competitive materials on the whole of totality of optimization criteria taking into account their weight. The offered method of material choice for heavy loaded cog-wheels allows choosing the best material reasoning from conditions of contact strength and life.

Key words: steel, case-hardening, physical and stress-strain characteristics, cylindrical cog-wheels, wear-resistance, durability (life).

Рассмотрим методику выбора подходящего материала из низкоуглеродистых легированных сталей 20ХН3А, 20Х2Н4А и 12Х2Н4А, применяемых при изготовлении зубчатых колёс. Указанные стали подвергаются цементации с последующей закалкой (нагрев и охлаждение в масле) и отпуском на воздухе. Твёрдость цементованного слоя (в зависимости от режима формирования) - HRC 57 ... 64, твёрдость сердцевины - HB 255 ... 420 (HRC > 30), толщина покрытия - 1,5 мм (минимальное значение).

В соответствии с техническими требованиями для колеса 2ТЭ25А.31.110.308, изготовленного из стали 20Х2Н4А, твёрдость сердцевины – HB > 294, а твёрдость цементованного слоя - HRC > 56. Толщина слоя - более 1,5 мм (1,6 … 2,4 мм - для колеса ТЭМ 18.ДМ.035.15.133).

Использование других сталей, в частности 20ХН3А и 12Х2Н4А, и сравнительная оценка эффективности и целесообразности их применения требуют разработки методики выбора необходимого материала.

Будем полагать, что цементирование зубьев зубчатых колёс из сталей 20ХН3А и 12Х2Н4А даёт такие же физико-механические характеристики [1], как и для стали 20Х2Н4А. При одинаковых геометрических параметрах пары «шестерня - колесо» и физико-механических характеристиках цементованного слоя все сравниваемые стали имеют один и тот же предел контактной выносливости [2]:

$$\sigma_{H\lim} = 23\bar{H}_{HRC},$$

где $H = (H_{HRC\min} + H_{HRC\max})/2$.

Примем во внимание следующие показатели, комплекс которых позволит выделить наилучший материал для зубчатых колёс. Стоимость колёс зависит от содержания легирующих компонентов. Так, цена никеля составляет около 15000 долларов США за тонну. С другой стороны, увеличение содержания хрома приводит к росту износостойкости. Изгибная выносливость (прочность и вязкость сердцевины) зависит от марки стали и её предела

прочности $\sigma_в$.

Итак, рассматриваются три материала, которые сравниваются по трём критериям: стоимости, износостойкости и прочности сердцевины. Требуется по этим трем критериям выбрать подходящий материал.

Методика выбора стали для зубчатых колёс

Пусть имеется три материала x_i, i = 1, 2, 3 (x_1, x_2, x_3), и три критерия оптимизации z_j, j = 1, 2, 3 (z_1, z_2, z_3 – стоимость, износостойкость, предел прочности сердцевины). Назначим вес (значимость) каждого из критериев $б_j$. Критерий z_1 имеет вес $б_1$ ($б_1$ = 3), z_2 - $б_2$ ($б_2$ = 2), z_3 – $б_3$ ($б_3$ = 2).

Определим приоритет и относительный приоритет сравниваемых материалов последовательно по каждому из критериев оптимизации. С этой целью используются квадратные матрицы смежности (табл. 3 – 5) [3] и рекомендуемые коэффициенты предпочтения (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты предпочтения

Варьирование критериев	x_i предпочтительнее x_{i+1}	x_{i+1} предпочтительнее x_i	x_i и x_{i+1} имеют равную предпочтительность
Незначительное	1,1	0,9	1
Среднее	1,5	0,5	1
Высокое	2	0,1	1

На основании данных, представленных в матрицах смежности, определяется комплексный относительный приоритет конкурирующих материалов по всей совокупности критериев оптимизации с учётом их веса:

$$C_i = \sum_{j=1}^{3} \left(P^0 \, x_i / z_j \right) \alpha_j .$$

В табл. 2 приведены материалы и их показатели (предел прочности взят из [4]).

Таблица 2

Материалы и их показатели

Материал	Стоимость (содержание никеля в %)	Износостойкость (содержание хрома в %)	Предел прочности $\sigma_в$, МПа
x_1 (сталь 20ХН3А)	3	1	900
x_2 (сталь 20Х2Н4А)	4	2	1100
x_3 (сталь 12Х2Н4А)	4	2	1200

Таблица 3

Матрица смежности по критерию z_1 (стоимость)

i	j = 1			$\sum a_{i,j}$	Px_1 / z_1	$P^0 x_1 / z_1$
	x_1	x_2	x_3			
x_1	1	1,5	1,5	4	11	0,44
x_2	0,5	1	1	2,5	7	0,28
x_3	0,5	1	1	2,5	7	0,28
				Сумма	25	1

Таблица 4

Матрица смежности по критерию z_2 (износостойкость)

i	$j = 2$			$\sum a_{i,j}$	$УРx_2 / z_2$	P^0x_2 / z_2
	x_1	x_2	x_3			
x_1	1	0,5	0,5	2	5,5	0,216
x_2	1,5	1	1	3,5	10	0,392
x_3	1,5	1	1	3,5	10	0,392
				Сумма	25,5	1

Таблица 5

Матрица смежности по критерию z_3 (предел прочности)

i	$j = 3$			$\sum a_{i,j}$	$УРx_3 / z_3$	P^0x_3 / z_3
	x_1	x_2	x_3			
x_1	1	0,5	0,5	2	5,5	0,22
x_2	1,5	1	0,5	3	8	0,32
x_3	1,5	1,5	1	4	11,5	0,46
				Сумма	25	1

Комплексные критерии:

$C_1 = 0{,}44 \cdot 3 + 0{,}216 \cdot 2 + 0{,}22 \cdot 2 = 2{,}192$;

$C_2 = 0{,}28 \cdot 3 + 0{,}392 \cdot 2 + 0{,}32 \cdot 2 = 2{,}26$;

$C_3 = 0{,}28 \cdot 3 + 0{,}392 \cdot 2 + 0{,}46 \cdot 2 = 2{,}54$.

Таким образом, в данном случае лучшим материалом для зубчатых колёс является сталь 12Х2Н4А.

Пример. Тепловоз 2ТЭ25А. Колесо: 2ТЭ25А.31.110.308, модуль $m = 10$, число зубьев z_2 = 73, степень точности 7 – В, сталь 20Х2Н4А (цементация). Шестерня: 2ТЭ25А.31.100.001, модуль m = 10, число зубьев z_1 = 20, сталь 20Х2Н4А (цементация с твёрдостью HRC 56 … 63 на глубину h = 1,6 … 2,4 мм).

Передаваемая мощность P = 470 кВт, частота вращения n = 2500 об/мин, момент при трогании $T_{трог}$ = 11800 Н·м, момент номинальный $T_{ном}$ = 10500 Н·м, коэффициент динамичности K_g = 1,5. Передаточное отношение $u = z_2 / z_1$ = 73 / 20 = 3,65. Момент на шестерне $T_1 = 9550\, P\, u / n = 9550 \cdot 470 \cdot 3{,}65 / 2500 = 6553$ Н·м. Момент на колесе равняется номинальному моменту: T_2 = 10500 Н·м. Рассмотрим вариант: цементованная шестерня и колесо без цементации.

Рассчитаем деформацию цементованной шестерни (сталь 20Х2Н4А) и колеса (сталь 45ХН, закалка ТВЧ, HRC 48 … 54):

$$\delta = \frac{2N_e}{\pi}\left[\theta_1\left(\ln\frac{2r_1}{\rho} + 0{,}407\right) + \theta_2\left(\ln\frac{2r_2}{\rho} + 0{,}407\right)\right].$$

Здесь эквивалентная удельная нагрузка $N_e = F_n / b = F_{t2} / \left(b\cos 20°\right)$; радиус кривизны $\rho = 1{,}128\sqrt{\theta_\Sigma r N_e}$; приведенный радиус колеса $r = \dfrac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$; механическая характеристика упругих свойств материалов $\theta_\Sigma = \theta_1 + \theta_2 = \dfrac{1-\mu_1^2}{E_1} + \dfrac{1-\mu_2^2}{E_2}$.

Для стального колеса модуль упругости $E_2 = 2{,}04 \cdot 10^5$ МПа, модуль Юнга μ_2 = 0,3. Для цементованного слоя модуль упругости $E_1 = 1{,}8 \cdot 10^5$ МПа, модуль Юнга μ_1 = 0,28.

Радиусы зубчатых колёс:

$r_1 = d_1 \sin 20° / 2 = m z_1 \sin 20° / 2 = 10 \cdot 20 \sin 20° / 2 = 34{,}20$ мм;

$r_2 = m z_2 \sin 20° / 2 = 10 \cdot 73 \sin 20° / 2 = 124{,}83$ мм.

Окружную силу найдём как

$$F_{t2} = 2T_2 / d_2 = 2 \cdot 10500 \cdot 10^3 / (10 \cdot 73) = 28770 \text{ Н}.$$

Учитывая, что ширина шестерни b = 140 мм, получим

$$Ne = 28770 \ \cos 20° / 140 = 193{,}107 \text{ Н/мм}.$$

Тогда

$$\rho = 1{,}128\sqrt{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)\frac{r_1 r_2}{r_1+r_2}N_e} = 1{,}128\sqrt{\left(\frac{1-0{,}3^2}{2{,}04\cdot 10^5}+\frac{1-0{,}28^2}{2{,}04\cdot 10^5}\right)\frac{34{,}20\cdot 124{,}83}{34{,}20+124{,}83}193{,}107} =$$

= 0,251 мм.

Подставив значение ρ в исходное выражение, получим сближение $\delta \cong 7{,}3$ мкм. При толщине цементованного слоя h_{min} = 1,5 мм внедрение, равное 7,3 мкм, можно считать очень незначительным, поэтому цементованный слой считают упругим полупространством (сплошным телом без покрытия).

Физико-механические характеристики цементованных зубьев должны соответствовать характеристикам цементованного слоя (табл. 6).

Таблица 6

Физико-механические свойства некоторых сталей, используемых при изготовлении зубчатых колёс

Сталь	Термообработка	Твёрдость рабочей поверхности	Твёрдость сердцевины	Глубина (толщина) цементованного слоя, мм
12Х2Н4А	Цементация (920-950 °С), закалка (780-800 °С, масло), отпуск (180 °С, воздух)	59...63 HRC	255...302 HB	-
20ХН3А	Цементация (920-950 °С), нормализация (870-890 °С, воздух), отпуск (630-660 °С, воздух), закалка 790-810 °С, масло), отпуск (180-200 °С, воздух)	58...62 HRC	≥ 240 HB	-
20Х2Н4А (ГОСТ 4543-71)	Цементация (920-950 °С), закалка (880-920 °С, масло), отпуск (630-660 °С, воздух)	Колесо - ≥ 56 HRC, шестерня - ≥58 HRC	≥ 30 HRC	1,5
45ХН (ГОСТ 4543-71)	Закалка ТВЧ	-	255...302 HB	3...7 (во впадинах -1...2)

Таким образом, предложена методика выбора материала для тяжелонагруженных зубчатых колес исходя из условия контактной прочности и долговечности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марочник сталей и сплавов / под ред. В.Г. Сорокина. - М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
2. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчёты на прочность.
3. Алафердов, О.Х. Аналитический метод выбора материалов в машиностроении / О.Х. Алафердов, Е.О. Габриэлян // Изв. вузов. Машиностроение. - 1978. - № 2. – С. 99 – 102.
4. Марочник стали для машиностроения. ОМТРМ 0056 – 002 – 68.

1. Reference Book of Steel and Alloy / under the editorship of V.G. Sorokin. - M.: Mechanical Engineering, 1989. – pp. 640.
2. SARS 21354-87. Cylindrical Involute Gearings of External Toothing. Stress Calculations.
3. Alaferdov, O.H. Analytical method for material choice in mechanical engineering / O.H. Alaferdov, E.O. Gabrielyan // Proceedings of Colleges. Mechanical Engineering. - 1978. - № 2. – pp. 99 – 102.
4. Reference Book of Steel for Mechanical Engineering. OMTRM 0056 – 002 – 68.

Статья поступила в редколлегию 29.12.2015.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Горленко О.А.

Сведения об авторах:

Тихомиров Виктор Петрович, д.т.н., профессор кафедры «Детали машин» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-12.

Стриженок Александр Георгиевич, к.т.н., профессор кафедры «Детали машин» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-12.

Tikhomirov Viktor Petrovich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Machinery” Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 58-82-12.

Strizhenok Alexander Georgievich, Can.Eng., Prof. of the Dep. “Machinery” Bryansk State Technical University Phone: (4832) 58-82-12.

УДК 621.763
DOI: 10.12737/20252

М.Ю. Куликов, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОТОТИПИРОВАНИИ

Исследованы проблемы, возникающие в процессе формообразования при трехмерной печати деталей. Сделан вывод о причинах возникновения дефектов деталей. Даны некоторые рекомендации по избежанию дефектов при прототипировании по технологии DLP.

Ключевые слова: трехмерная печать, прототипирование, точностные параметры, фотополимер, седлообразность, STL-формат, технология DLP.

M.Yu. Kulikov, M.A. Larionov, D.V. Gusev

ANALYSIS OF REGULARITIES IN ACCURACY PARAMETERS FORMATION AT PROTOTYPING

The purpose of the work was the study of regularities in the cylindrical surface formation at prototyping. To achieve the task there were developed sketches of two parts of “cylinder” type. According to the sketches in the CAD medium there were formed two 3D computer parts. The next step to achieve the task was the conversion of the designed and created parametric 3D part in STL format. The printing was carried out in two product lines: the cylinders of the first product line were printed at the maximum rate of the formation (V_{form}=12.7mm/h) and at the maximum layer thickness (S_{layer}=100 mkm), and cylinders of the second product line – at V_{print}=5 mm/h; S_{layer}=50 mkm. The parts were printed according to the method of rapid protopyping (RP) – photopolymer light curing (Direct Light Projection –DLP) on Envision Ultra 3SP plant. Material – high-temperature photopolymer resin HTM 140. Heat-resistance of this material makes 140°C.

As a result of the research there was revealed a vivid saddle-shaped form in printed cylinders. The reason of a hidden defect lies in a high rate of printing and also in a layer thickness. It should be excluded that the reason of an error can be electronic mistakes during a 3D conversion of an object from CAD medium into STL format.

Key words: 3D printing, prototyping, accuracy parameters, photopolymer, saddle-shape form, STL format, DLP technique.

Предметом исследования и разработки в технологии машиностроения являются виды обработки, выбор заготовки, качество обрабатываемых поверхностей, точность обработки и припуски на нее, базирование заготовок; способы механической обработки поверхностей – плоских, цилиндрических, сложнопрофильных и др. [1].

Изготовление деталей по традиционной технологии основано на механической обработке их заготовок. Так как это весьма трудоемкая и энергозатратная задача, то традиционные технологии становятся менее практичными и перспективными. Для штучного и мелкосерийного производства наиболее оптимальным решением является внедрение генеративных технологий, например технологий 3D-печати. В случае невозможности изготовления детали по традиционной технологии механообработки из-за сложной формы изделия 3D-печать является одним из выходов из сложившейся ситуации. Современные технологии 3Dпрототипирования позволяют достаточно оперативно получить точную деталь с минимальными затратами.

Прототипирование - быстрая черновая реализация базовой функциональности для анализа работы системы в целом. На этапе прототипирования малыми усилиями создается работающая система (возможно, неэффективно, с ошибками и не в полной мере). После этапа прототипирования в

большинстве случаев следуют этапы пересмотра объекта, разработки, реализации и тестирования конечного продукта.

Целью работы было изучение закономерностей формирования цилиндрических поверхностей при прототипировании. Для достижения поставленной цели были разработаны две детали типа «цилиндр», эскизы которых приведены на рис. 1 и 2, и напечатаны на 3D-принтере.

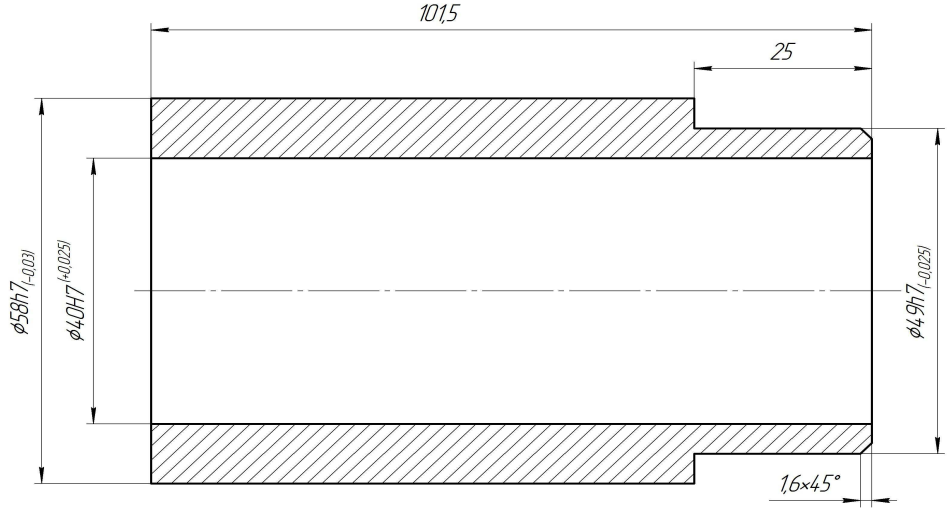


Рис.. 1. Цилиндр первой серии

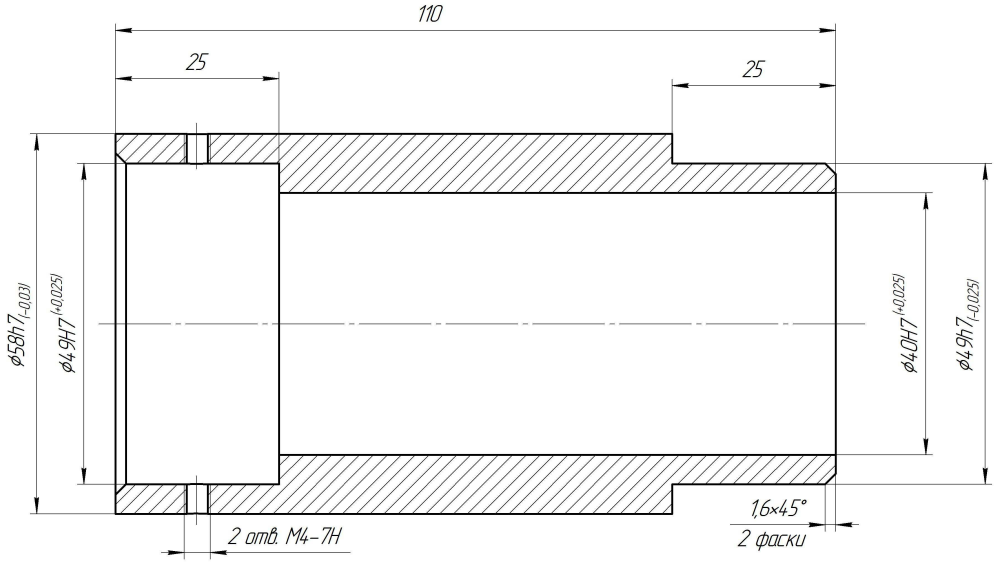


Рис. 2. Цилиндр второй серии

Печать происходила двумя сериями: цилиндры первой серии были напечатаны при максимальной скорости построения ($V_{построения}$=12,7 мм/ч) и максимальной толщине слоя ($S_{слоя}$=100 мкм), а цилиндры второй серии – при $V_{печати}$=5 мм/ч, $S_{слоя}$=50 мкм. Каждая серия состояла из 4 деталей. Детали печатались по методу быстрого прототипирования (Rapid Prototyping - RP) – светоотверждения фотополимера (Direct Light Projection - DLP) на установке Envisiontec Ultra 3SP. Материал – HTM 140, теплостойкость которого составляет 140°С.

Сущность данного метода печати состоит в том, что строятся трехмерные объекты по методу проецирования световых масок. Полимеризация материала осуществляется не по точкам, а послойно, по растровым маскам. Благодаря этому скорость построения не зависит от размеров и сложности детали. Для построения модели используется акриловый фотополимер. Отверждение слоя осуществляется ульт-

рафиолетовой лампой. Процесс, разработанный компанией Texas Instruments, используется фирмой Envisiontec (Германия) [2].

По эскизам (рис. 1 и 2) в среде CAD были созданы две трехмерные компьютерные детали типа «цилиндр». Следующим шагом к достижению поставленной цели стал перевод спроектированной и созданной трехмерной детали в STL-формат.

После изготовления (без всякой дальнейшей механообработки) один из цилиндров первой серии был установлен на оправку и закреплен в трехкулачковом патроне станка 16К20 с целью измерения биения и отклонения от круглости. На рис. 3 показана схема измерения детали, которое выполнялось с помощью индикатора часового типа (цена деления - 0,002 мм) через каждые 6^0 на расстоянии 10 мм по поверхности детали.

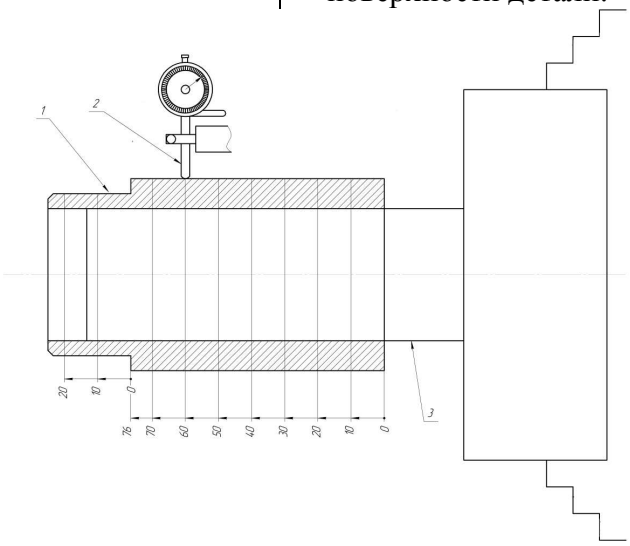


Рис. 3. Схема измерения: 1 – цилиндр первой серии; 2 – индикатор часового типа; 3 – оправка

Далее на биение и отклонение от круглости был проверен цилиндр второй серии. На основании полученных данных построен график отклонения от круглости (рис. 4), из которого видно, что на обоих цилиндрах прослеживается ярко выраженная седлообразность.

Седлообразность - частный вид отклонения профиля продольного сечения, при котором образующие цилиндрической детали непрямолинейны, а ее диаметры уменьшаются от краев детали к ее середине.

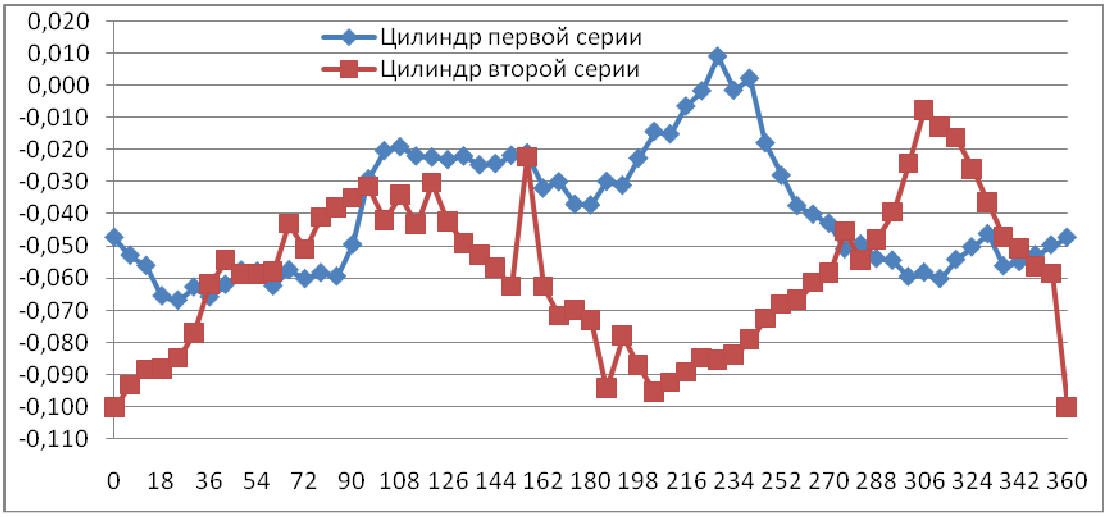


Рис. 4. График отклонения от круглости

Причина такого дефекта обеих деталей кроется в высокой скорости печати, а также толщине слоя. Нельзя исключать и того, что причиной погрешности могут быть электронные ошибки при переводе трехмерного объекта из CAD-среды в STL-формат. Еще одной причиной является позиционирование деталей на подложке во время печати: слой фотополимера, который наносился при печати, не успевал затвердевать полностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евсеев, Д.Г. Оптимизация процессов механической обработки: учеб. пособие /Д.Г. Евсеев, О.М. Тарасевич. - М.: МИИТ, 2007.-107 с.
2. Грабченко, А. И. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие / А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В.Л. Доброскок; ред. А.И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с.

1. Yevseyev, D.G. Machining Optimization: Reference book/ D.G. Yevseyev, O.M. Tarasevich. – M.: MIIT, 2007. – pp.107.
2. Grabchenko, A.I. Integrated Generative Techniques: Reference book / A.I. Grabchenko, Yu.N. Vnukov, V.L. Dobroskok: ed. A.I. Grabchenko. – Kharkov: NTU “KHPI”, 2011. – pp. 416.

Статья поступила в редколлегию 9.11.2015.
Рецензент: д.т.н., профессор Верещака А.С.

Сведения об авторах:

Куликов Михаил Юрьевич, д. т. н., профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения, e-mail: muk.56@mail.ru.
Ларионов Максим Александрович, к.т.н., начальник группы, ст. научный сотрудник ФГУП ЦНИИмаш, г.Королев, e-mail: pioneer_maxim@mail.ru.
Гусев Денис Витальевич, аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения, e-mail: dess.2010@mail.ru.

Kulikov Mikhail Yurievich, D.Eng. , Prof. of the Dep. “Technology of Transport Engineering and Rolling-Stock Repair”
Moscow State Communications University, e-mail: muk.56@mail.ru.
Larionov Maxim Alexandrovich, Can.Eng., Chief of the Group, Senior Researcher of FSEC CSRImach, Korolyov, e-mail: pioneer_maxim@mail.ru.
Gusev Denis Vasilievich, Post graduate student of the Dep. “Technology of Transport Engineering and Rolling-Stock Repair” Moscow State Communications University, e-mail: dess.2010@mail.ru.

УДК 621.763
DOI: 10.12737/20253

М.Ю. Куликов, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРОТОТИПИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ С УСЛОВИЯМИ ИХ БАЗИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ

Описана одна из перспективных технологий послойной печати изделий. Приведено краткое описание принципа работы установки и использованного материала для выращивания образцов. Получены 3D-картины поверхностей образцов, которые наглядно показывают, что условия базирования влияют на шероховатость поверхности при прототипировании. Найдена оптимальная схема базирования образцов при печати.

Ключевые слова: прототипирование, детали машин, фотополимер, послойная печать, шероховатость, условия базирования.

M.Yu. Kulikov, M.A. Larionov, D.V. Gusev

CORRELATION INVESTIGATION OF SURFACE ROUGHNESS IN PROTOTYPED SAMPLES WITH CONDITIONS OF THEIR LOCATION AT MANUFACTURING

The purpose of this work is to reveal the influence of the location of the product grown upon roughness during shaping at prototyping. To achieve the goal specified there were chosen plates with dimensions 10x10x3mm, and the surface investigated – a plane 10x10mm. Some sets of plates were printed on a 3D printer Envision Ultra 2 of high-temperature photo – polymeric resin NTM 140 according to Direct Light Projection (DLP). The plates made of NTM 140 after extraction from a printer have temperature durability of 140°C.

For more exact and deep researches of the phenomenon mentioned there was used a method of atomic – power microscopy (APM) for the definition of the surface micro-relief in samples under investigations. As a basic tool for the analysis of surface micro-relief a scanning microprobe microscope Solver Pro, and program package WSxM allowed obtaining 3D images of a surface layer of samples.

It is evident from the results presented that at the formation of a flat by means of the quick prototyping method according to a DLP type technology the most optimum scheme of location is that at which the angle of basic plane slope makes 8°.

Key words: prototyping, machinery, photopolymer, layered printing, roughness, location conditions.

В последние годы все большее распространение находят технологии Rapid Prototyping (PR) для изготовления деталей различного назначения. Прототипирование - это быстрая реализация базовой функциональности объекта для анализа работы системы в целом. На этапе прототипирования малыми усилиями создается условно работающая система. После этапа прототипирования обычно следуют этапы доработки объекта, разработки, реализации и тестирования конечного продукта. Но в большинстве случаев применение технологий прототипирования приводит к получению изделий, которые используются в реальном производстве напрямую [1].

Эффект от применения быстрого прототипирования выражается в значительном сокращении времени и затрат на разработку новых изделий, а также в повышении качества разработки.

Одной из перспективных технологий выращивания изделий из полимерных материалов является технология Direct Light Projection (DLP). Эта технология - одна из самых быстрых, точных, она требует минимальных затрат материальных и трудовых ресурсов, что немаловажно в современных условиях рынка машиностроительной продукции.

В технологии DLP для построения модели используется фотополимер, отверждение которого происходит при помощи

УФ-излучения. Процесс разработан Texas Instruments и используется фирмой Envisiontec (Германия). На установках компании Envisiontec (рис. 1) полимеризация материала осуществляется не по точкам, а послойно, по растровым маскам. Благодаря этому скорость построения зависит не от размеров и сложности детали, а только от количества слоев. Скорость построения по Z составляет от 10 до 20 мм/ч (в зависимости от толщины слоя) [2].

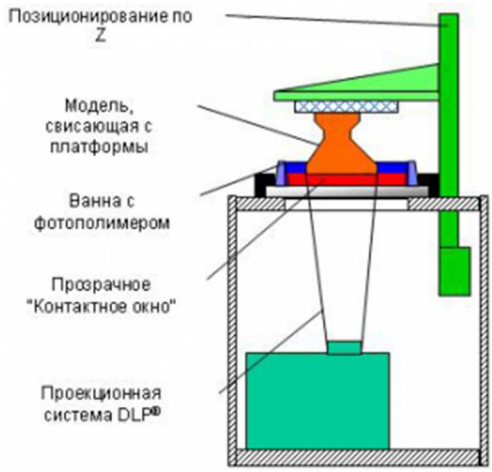


Рис. 1. Принципиальная схема рабочей части установки

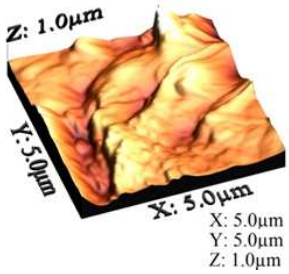
Отличительной особенностью технологии DLP является то, что изделия, получаемые после выращивания и удаления поддерживающих элементов, пригодны для дальнейшего использования без всякой механической и иной доработки, так как отклонение точности деталей не превышает 0,0005 мм, а чистота поверхностного слоя соответствует Ra порядка 0,63. Такие точностные характеристики обеспечивает не каждая технология быстрого прототипирования. Чаще всего после процесса выращивания требуется дополнительная механическая обработка деталей, что увеличивает время изготовления и стоимость конечного продукта.

В ходе отработки технологии авторами было замечено, что на точность и качество выращиваемого изделия очень сильно влияет положение его ответственных поверхностей относительно контактного окна. При различных схемах базирования изделия шероховатость поверхностного слоя изменялась, но не превышала Ra 0,63.

Цель работы - выявить влияние базирования выращиваемого изделия на шероховатость во время процесса формообразования при прототипировании.

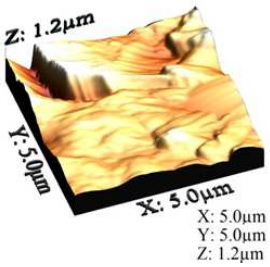
В качестве образцов были выбраны пластины размером 10x10x3 мм, а исследуемая поверхность – плоскость 10x10 мм. Несколько серий пластин из высокотемпературного фотополимера HTM 140 были напечатаны по технологии DLP на 3D-принтере Envisiontec Ultra 2. Пластины, изготовленные из HTM 140, после извлечения из принтера имеют температурную стойкость 140 °С. Материал HTM 140 - один из самых востребованных среди представленных компанией Envisiontec в машиностроении. Серия состоит из 5 пластин, различающихся между собой углом наклона между исследуемой базовой поверхностью и контактным окном, который варьировался от 0 до 10° с шагом в 2°.

Результаты исследований каждой серии образцов представлены на рис. 2 – 7.



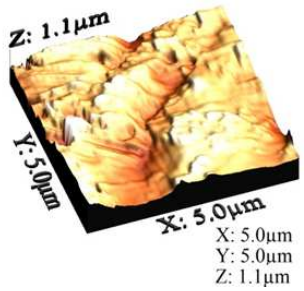
Max	1028,72 nm
Min	0 nm
Амплитуда высот, Sy	1028,72 nm
Средняя шероховатость, Sa	106,17 nm

Рис. 2. Трехмерная картина состояния поверхностного слоя образцов 1-й серии с углом наклона базовой поверхности 0°



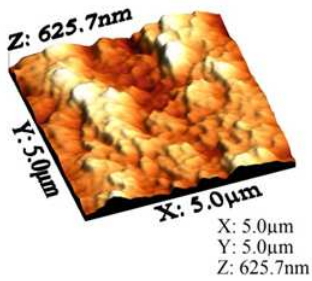
Max	1213,04 nm
Min	0 nm
Амплитуда высот, Sy	1213,04 nm
Средняя шероховатость, Sa	105,232 nm

Рис. 3. Трехмерная картина состояния поверхностного слоя образцов 2-й серии с углом наклона базовой поверхности 2°



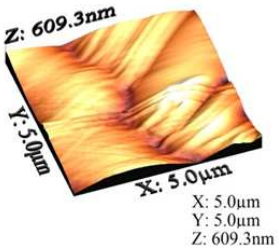
Max	1085,72 nm
Min	0 nm
Амплитуда высот, Sy	1085,72 nm
Средняя шероховатость, Sa	103,799 nm

Рис. 4. Трехмерная картина состояния поверхностного слоя образцов 3-й серии с углом наклона базовой поверхности 4°



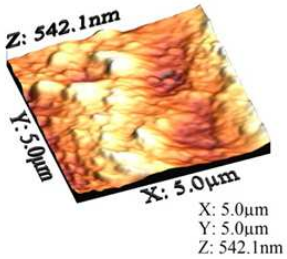
Max	625,754 nm
Min	0 nm
Амплитуда высот, Sy	625,754 nm
Средняя шероховатость, Sa	84,082 nm

Рис. 5. Трехмерная картина состояния поверхностного слоя образцов 4-й серии с углом наклона базовой поверхности 6°



Max	609,3 nm
Min	0 nm
Амплитуда высот, Sy	542,092 nm
Средняя шероховатость, Sa	62,347 nm

Рис. 6. Трехмерная картина состояния поверхностного слоя образцов 5-й серии с углом наклона базовой поверхности 8°



Max	542,1nm
Min	0 nm
Амплитуда высот, Sy	609,352 nm
Средняя шероховатость, Sa	83,1501 nm

Рис. 7. Трехмерная картина состояния поверхностного слоя образцов 6-й серии с углом наклона базовой поверхности 10°

Из представленных результатов видно, что при формировании плоской поверхности методом быстрого прототипирования по технологии DLP самой оптимальной схемой базирования является та, при которой угол наклона базовой плоскости составляет 8°. Это обьясняется тем, что площадь выращиваемого слоя меньше, чем при угле наклона 0°, и в процессе отлипания от контактного окна минимально воздействие следующего слоя на предыдущий, который еще до конца не заполимеризовался. При угле наклона базовой поверхности более 8° отрицательное воздействие оказывает сила тяжести, что приводит к сдвигу недополимеризованного слоя и повышению шероховатости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грабченко, А. И. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие / А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В.Л. Доброскок; ред. А.И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с.
2. http://www.cybercom.ru.

1. Grabchenko, A. I. Integrated generative Techniques: Manual / A. I. Grabchenko, Yu. N. Vnukov, V.L. Dobroskok;Ed. A.I. Grabchenko. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2011. – pp. 416.
2. http://www.cybercom.ru.

Статья поступила в редколлегию 9.11.2015.
Рецензент: д.т.н., профессор Верещака А.С.

Сведения об авторах:

Куликов Михаил Юрьевич, д. т. н., профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения, e-mail: muk.56@mail.ru.
Ларионов Максим Александрович, к.т.н., начальник группы, ст. научный сотрудник ФГУП ЦНИИмаш, г.Королев, e-mail: pioneer_maxim@mail.ru.
Гусев Денис Витальевич, аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения, e-mail: dess.2010@mail.ru.

Kulikov Michael Yurievich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock” Moscow State University of Communications, e-mail: muk.56@mail.ru.
Larionov Maxim Alexandrovich, Can.Eng., Head of the group, Senior Researcher of FSUC CRImach, Korolyov, e-mail: pioneer_maxim@mail.ru.
Gusev Denis Vitalievich, Post graduate student of the Dep. “Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock” Moscow State University of Communications, e-mail: dess.2010@mail.ru.

УДК 621.923+629.7
DOI: 10.12737/20254

В.И. Бутенко, Л.В. Гусакова, А.Д. Кулинский

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

С целью повышения эффективности шлифования поверхностей деталей машин разработаны и предложены для широкого использования в машиностроении перспективные направления, связанные с совершенствованием конструкций шлифовальных кругов, составом абразивных масс для изготовления инструментов и способами их импрегнирования с использованием дийодида хрома. Приведены результаты сравнения разработанных направлений повышения эффективности шлифования поверхностей деталей машин и определены наиболее рациональные области их применения в металлообработке.

Ключевые слова: эффективность, абразивная масса, дисперсность, импрегнирование, шлифовальный круг.

V.I. Butenko, L.V. Gusakova, A.D. Kulinsky

PROMISING DIRECTIONS TO INCREASE GRINDING EFFICIENCY IN MACHINE PARTS SURFACES

The problem of grinding process increase for machine parts surfaces can be solved by means of abrasive disks design updating, their composition and impregnation technologies. The structures of multiple grinding wheels containing rods in a basic abrasive mass including conducting elements are offered. Such disks allow increasing quality in surfaces machined of parts made of tough hard-to-machine steel and alloys on the basis of non-ferrous metals on indices of roughness, technological residual stresses and burns. High efficiency show multi-sector abrasive disks of different grain allowing the increase considerably the intensity of material removal at machining parts made of chromium-nickel steel and alloys. The effective compositions of abrasive masses are developed for tool manufacturing including the introduction in them high-strength ferritic iron, chromium diiodide and wood resin. Polishing tools made of abrasive mass have 1.5 – twice higher durability between stropping operations and ensure the decrease of burn areas quantity on machined surfaces of parts 2-2.5 times. The promising direction of the efficiency increase in parts surface grinding is the impregnation of abrasive disks by an aqueous solution of chromium diiodide which possesses high anticeptic properties and at the iodine emission forms iron iodides with a low constant of friction. As a result of this the temperature drops in the grinding area by more than 30%.

Key words: efficiency, abrasive mass, dispersity, impregnation, abrasive disk.

Введение

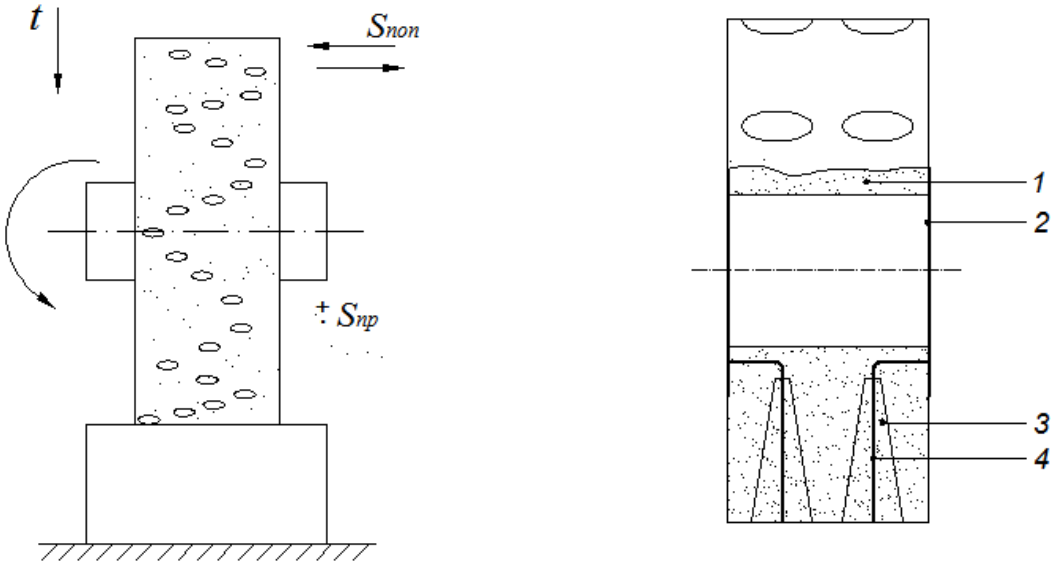
В технологических процессах механической обработки деталей машин операции шлифования занимают важное место, так как на них достигаются требуемые точность размеров и показатели качества поверхностного слоя. Анализ имеющейся технической информации по вопросам финишной обработки деталей свидетельствует о том, что большое количество выполняемых в настоящее время научных исследований и разработок ориентированы на интенсификацию процессов шлифования, направленную на повышение производительности обработки. Однако при этом не всегда в полной мере решаются вопросы обеспечения эксплуатационных показателей качества обрабатываемых поверхностей деталей, что, например, очень актуально для деталей трибосистем. Следует иметь в виду, что проблема повышения эффективности процессов шлифования поверхностей деталей из высоколегированных и жаропрочных сталей и сплавов многосторонняя и затрагивает все этапы технологического процесса. Именно поэтому комплексный подход к поиску перспективных направлений повышения эффективности шлифования поверхностей деталей машин является наиболее востребованным, экономически оправданным и

технически обоснованным в современном машиностроении. Разработанные перспективные направления повышения эффективности шлифования поверхностей деталей машин связаны с совершенствованием конструкций шлифовальных кругов, их составов и импрегнированием.

Совершенствование конструкций шлифовальных кругов

Одним из направлений совершенствования конструкций шлифовальных кругов может стать введение в них дополнительных элементов (рис. 1). Так, для снижения величины технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя шлифованной детали предложена конструкция составного абразивного круга, выполненного из абразивной массы разной зернистости, в котором в основной абразивной массе одной зернистости в радиальном направлении размещены стержни, выполненные из основной абразивной массы с добавлением абразива большей зернистости и повышенной твёрдости при соотношении 2:1 и имеющие форму усечённых конусов (рис. 1 а) [1]. При этом стержни размещены с образованием на периферии круга формы замкнутой симметричной синусоиды с шагом вдоль синусоиды $3d_{ст}$, где $d_{ст}$ – диаметр стержня в основании конуса, принимаемый равным $d_{ст}$ = (0,12 – 0,15)B (здесь B – высота круга). Стержни длиной $l_{ст} = 5d_{ст}$ и конусностью 1:10 устанавливаются с выходом меньшего диаметра на периферию круга с расстоянием между их осями, равным $L = 1{,}2d_{ст}$.

Испытания предложенной конструкции шлифовальных кругов на эффективность проводились на круглошлифовальном станке мод. 3М151, оборудованном специальным защитным кожухом. Абразивные круги размером 400×60×127 мм изготавливались из электрокорунда белого 25А зернистости 20 (основная абразивная масса), а стержни - из электрокорунда 25А зернистости 20 с добавлением в основную абразивную массу электрокорунда хромотитанистого 95А повышенной твёрдости 40 в соотношении 2:1.



а) б)

Рис. 1. Усовершенствованные конструкции шлифовальных кругов: а − абразивный круг из абразивной массы разной зернистости; б − абразивный круг с токопроводящими элементами (1 − абразивный материал; 2 − токопроводящие элементы на торцах; 3 − радиально размещённые токопроводящие элементы; 4 − армирующие электроды)

Для изготовления стандартных абразивных кругов в соответствии с ГОСТ 2424-83 и составных абразивных кругов предложенной конструкции использовалась керамическая связка К1. Обработке подвергались цилиндрические образцы из сталей 12Х2Н4А, 20ХН2МА и 60ГС2, имеющие ступень диаметром 36 мм и дли-

ной 50 мм. Шлифование этих ступеней осуществлялось по методу врезания с поперечной подачей $S_{поп}$ = 0,6 мм/мин и скоростью вращения обрабатываемого образца $V_д$ = 0,36 м/с. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовался 5-процентный водный раствор эмульсола Укринол-1. Оценочными показателями при испытаниях составных абразивных кругов были приняты максимальная скорость вращения круга V_{max}, при которой не происходило его разрушение, и показатели качества обработанной поверхности детали: параметр шероховатости *Ra*, величина технологических остаточных напряжений в материале обработанного поверхностного слоя $\sigma_{ост}$ и относительная площадь поверхности детали ΔS, подвергнутая прижогу.

Результаты испытаний приведены в табл. 1, из анализа которой видно, что составные абразивные круги имеют более высокую прочность, позволяющую выполнять обработку поверхностей деталей из вязких труднообрабатываемых и повышенной твёрдости сталей на скоростях в 1,4 – 1, 6 раза выше, чем при использовании стандартных абразивных кругов. При этом достигается более высокое качество обработанной поверхности детали по показателям *Ra*, $\sigma_{ост}$ и ΔS.

Для шлифования поверхностей деталей из электропроводных труднообрабатываемых сплавов может быть использован шлифовальный круг, конструкция которого представлена на рис. 1 б [2]. Этот круг, выполненный из абразивного материала 1 и имеющий на торцах токопроводящие элементы 2, снабжён радиально размещёнными в абразивном материале токопроводящими элементами 3, выполненными в виде расширяющихся от центра стержней.

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний абразивных кругов

Марка стали	Оценочные показатели абразивных кругов							
	Стандартный круг по ГОСТу				Составной круг			
	V_{max}, м/с	*Ra*, мкм	$\sigma_{ост}$, МПа	ΔS, %	V_{max}, м/с	*Ra*, мкм	$\sigma_{ост}$, МПа	ΔS, %
12Х2Н4А	38,5	1,33	330	19	51,3	1,17	310	9
20ХН2МА	35,0	1,46	370	23	56,5	1,24	330	12
60ГС2	31,6	1,72	410	29	49,6	1,32	350	16

Стержни 3 изготавливают из абразивной массы с добавлением серого чугуна и армируют электродами 4, связанными с токопроводящими элементами 2 на торцах шлифовального круга. При этом твёрдость абразива стержней 3 рекомендуется принимать выше твёрдости основного абразивного материала 1 шлифовального круга. Для более устойчивого закрепления электродов 4 в стержнях 3 их рекомендуется выполнять ступенчатыми по длине, квадратного сечения и с зазубринами на рёбрах, расположенными в шахматном порядке [3].

Исследования показали, что введение в зону контакта абразивных зёрен с обрабатываемым материалом электрического тока приводит к диспергированию материала поверхностного слоя и образованию оксидных плёнок, которые легко снимаются при шлифовании. Наличие в шлифовальном круге стержней повышенной твёрдости способствует возникновению в зоне резания микроударов и микровибраций, которые уменьшают засаливание круга. Одновременно повышается геометрическая точность обрабатываемых деталей, изменяется дислокационная структура материала поверхностного слоя и уменьшается величина технологических остаточных напряжений. Наибольшая эффективность достигается при использовании шлифовальных кругов с токопроводящими элементами для чистового и тонкого шлифования поверхностей деталей из хромоникелевых сплавов, а также сплавов на основе меди, алюминия и титана.

Разработаны и предложены к использованию при шлифовании различной формы поверхностей деталей машин шлифовальные круги, содержащие крупнозернистые и мелкозернистые участки абразива,

попарно разделённые абразивными секторами меньшей твёрдости (рис. 2) [4; 5]. При этом участки крупнозернистого (1) и мелкозернистого (2) абразива могут быть выполнены одинаковой длины по наружной дуге шлифовального круга; длина участка с меньшей твёрдостью 3 обычно делается в два раза меньшей. Для мелкозернистого участка используют микрошлифпорошки, для крупнозернистого - шлифзерно, а для участка абразива меньшей твёрдости – шлифпорошки. В общем случае твёрдость абразива для многосекторного шлифовального круга разной зернистости выбирается в зависимости от твёрдости обрабатываемого материала.

Исследования показали, что при использовании многосекторных шлифовальных кругов разной зернистости участки абразива с меньшей твёрдостью изнашиваются быстрее, чем остальные, образуя перед крупнозернистыми участками круга микровпадины. При входе крупнозернистого участка абразива в соприкосновение с материалом обрабатываемой детали возникают микроудары и микровибрации. В результате эффективность процесса шлифования повышается, так как уменьшается засаливание круга (увеличивается суммарное время непрерывной работы между переточками круга $t_{пер}$), увеличивается интенсивность съёма материала Y, снижаются показатель шероховатости обработанной поверхности детали Ra и технологические остаточные напряжения $\sigma_{ост}$, существенно уменьшается относительная площадь ΔS, что является особенно важным при обработке хромоникелевых сталей и сплавов (табл. 2).

Таблица 2

Оценочные данные по определению эффективности многосекторных шлифовальных кругов разной зернистости

Обрабатываемый материал	Используемый круг	Показатели эффективности				
		Y, г/г	Ra, мкм	$\sigma_{ост}$, МПа	ΔS, %	$t_{пер}$, мин
Сталь 12Х2Н4А	Стандартный	4,76	2,19	360	37	46
	Многосекторный	5,65	1,74	300	17	65
Сталь 20ХН2МА	Стандартный	4,95	2,12	350	35	33
	Многосекторный	6,10	1,63	280	18	52
Сплав ХН62МВКЮ	Стандартный	4,08	2,16	490	40	24
	Многосекторный	4,75	1,75	380	18	40
Сплав ХН77ТЮР	Стандартный	4,05	2,24	510	45	22
	Многосекторный	4,65	1,77	400	20	37

Эффективные составы абразивных масс для изготовления инструмента

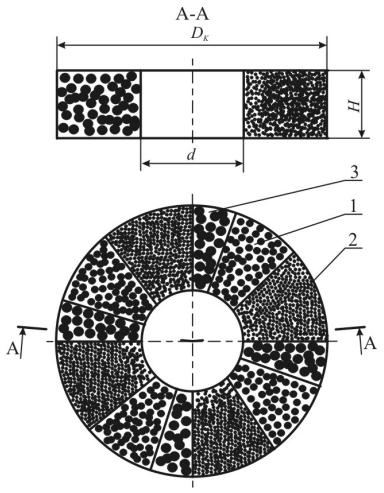


Рис. 2. Схема многосекторного шлифовального круга разной зернистости: 1 – крупнозернистый участок; 2 – мелкозернистый участок; 3 – участок абразива меньшей твёрдости

Эффективность финишной обработки поверхностей деталей машин с использованием абразивных инструментов может быть существенно повышена путём добавления в абразивную массу различных компонентов, в том числе поверхностно-активных веществ (ПАВ) [6 – 8].

Так, для уменьшения расхода абразивного материала при изготовлении инструментов для тонкого шлифования, хонингования, суперфиниширования и других способов абразивной обработки поверхностей деталей, улучшения качественных характеристик поверхностного слоя в абразивную массу предложено вводить высокопрочный ферритный чугун ВЧ 38-17, ВЧ 42-12, ВЧ 50-7 (ГОСТ 7293 – 79) дис-

персности $D_ч$ = (1,2 – 1,5)d_A, где d_A – дисперсность используемого абразива [6]. Применение в абразивной массе для изготовления инструмента высокопрочного ферритного чугуна в качестве наполнителя обусловлено тем, что он, обладая режущими свойствами при дисперсности выше $5 \cdot 10^{-6}$м, обладает способностью к сглаживанию микронеровностей обрабатываемой поверхности за счёт содержащегося в нём связанного графита шаровидной формы. Поскольку феррит высокопрочного чугуна, работающего как абразив, значительно мягче абразивных зёрен, то приготовленная по предложенной технологии масса для изготовления абразивного инструмента обладает некоторой пластичностью. В связи с этим для изготовления профильного абразивного инструмента рекомендуется использовать массу следующего состава, % [6]: абразив – 20 – 45; полиэтиленполиамин – 2,5 – 5,0; органический модификатор – 1,5 – 3,0; высокопрочный ферритный чугун – 17 – 40; эпоксидная смола – остальное.

Из абразивной массы предложенного состава были изготовлены профильные тарельчатые круги с наружным диаметром 310 мм для шлифования боковых поверхностей зубьев шестерни тяговой передачи электровоза с модулем 10 мм и числом зубьев 21, изготовляемой из стали 12ХН3. В качестве абразива использовался электрокорунд 14А зернистости F180 (ГОСТ Р 52381-2005), а в качестве наполнителя - чугун ВЧ 38-17, количественный состав которых соответствовал 40 и 30 %. Шлифование боковых поверхностей зубьев шестерни, подвергнутой цементации и имеющей твёрдость поверхностного слоя HRC 42…46, осуществлялось на зубошлифовальном станке мод. 5Е820 при скорости вращения круга $V_{кр}$ = 25 м/с и припуске на сторону 0,2 мм. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовалось индустриальное масло И-50А (ГОСТ 20799-88).

Исследования показали, что применение при зубошлифовании крупномодульных зубчатых колёс профильных кругов, изготовленных из предложенной абразивной массы, позволяет практически полностью исключить прижоги боковых поверхностей зубьев и более чем в 3 раза увеличить период стойкости кругов.

Для повышения стойкости абразивного инструмента и уменьшения количества зон прижога на обработанной поверхности детали разработан состав абразивной массы, содержащий кристаллический йод в виде микропорошка дисперсности 10 – 20 мкм [7]. Обладая высокой адсорбционной и химической активностью по отношению к металлам, кристаллический йод образует на обрабатываемой поверхности детали йодиды металлов, имеющие низкий коэффициент трения. В результате локальная температура в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом снижается, не происходит плавление материала, что приводит к уменьшению засаливания абразивного инструмента и количества зон прижога на обработанной поверхности. Применение при тонком шлифовании деталей из стали 30ХГСА и сплава 45Х25Н20С2А кругов из предложенной массы для изготовления абразивного инструмента позволило уменьшить в 2 – 2,5 раза количество зон прижога и в 1,5 – 2 раза увеличить время между правками.

Однако введение в абразивную массу для изготовления инструмента кристаллического йода ограничено тем, что он возгоняется при температурах 250 – 300°С. Вместо кристаллического йода в состав абразивной массы можно ввести дийодид хрома, разлагающийся при температурах выше 500°С. Исследования показали, что вследствие нестабильности локальных температур в зоне контакта абразивных зёрен с обрабатываемым материалом, изменяющихся в диапазоне 550 – 650°С, разложение дийодида хрома и образование йодидов железа на поверхности детали протекает нестабильно с формированием структурно неодинаковых комплексных соединений, что сказывается на равномерности распределения йодидов железа как по поверхности, так и по толщине образующегося слоя. Было предложено в состав массы для изготовления абразивного инструмента дополнительно ввести порошок древесной золы дисперсности 3 – 5мкм, позволяющий стабилизировать про-

цесс разложения дийодида хрома и образования йодидов железа, повысить температурную стойкость эпоксидной смолы, а также модифицировать структуру получаемых йодидов по размерам и распределению. При этом следует отметить, что вводимая в массу для изготовления абразивного инструмента в качестве модификатора и стабилизатора древесная зола значительно дешевле органических модификаторов, используемых в абразивных массах аналогов. Для повышения температурной стойкости абразивных инструментов и снижения их стоимости предложена абразивная масса, содержащая древесную золу и дийодид хрома при следующем соотношении компонентов, % [8]: абразив – 40 – 50; полиэтиленполиамин – 3,5 – 5,0; высокопрочный ферритный чугун – 15 – 20; древесная зола – 5 – 8; дийодид хрома – 3 – 5; эпоксидная смола – остальное.

Проведены сравнительные испытания шлифовальных кругов, изготовленных без добавления в абразивную массу древесной золы (абразив 14А зернистости F60 – 45%, полиэтиленполиамин – 4%, высокопрочный ферритный чугун ВЧ 38-17 – 21%, дийодид хрома – 6%, эпоксидная смола ЭД-5 – 26%) и из предлагаемой абразивной массы (абразив 14А зернистости F60 – 45%, полиэтиленполиамин – 4%, высокопрочный ферритный чугун ВЧ 38-17 – 15%, древесная зола – 6%, дийодид хрома – 4%, эпоксидная смола ЭД-5 – 26%). Обрабатывались валики диаметром 24 мм и длиной 320 мм из сталей 12Х2Н4А, 20ХН2МА, 30ХГСА и сплавов ХН62МВКЮ, ХН77ТЮР на круглошлифовальном станке мод. 3М151 с использованием в качестве смазочно-охлаждающей жидкости 5-процентного водного раствора эмульсола Укринол-1. Режимы шлифования были приняты согласно данным, приведённым в работах [1 – 6]. Использовались шлифовальные круги из электрокорунда нормального 14А зернистости F60 (ГОСТ Р 52381-2005), которые имели размеры 400×40×127 мм. Оценка эффективности разработанной массы для изготовления абразивного инструмента осуществлялась по показателю шероховатости обработанной поверхности *Ra*, относительной площади прижогов *ΔS* и толщине поверхностного слоя с изменёнными физико-механическими свойствами *ΔH*.

Результаты сравнительных испытаний эффективности использования шлифовальных кругов разного состава приведены в табл. 3. Из их анализа следует, что введение в абразивную массу древесной золы позволяет уменьшить шероховатость обработанных поверхностей деталей на 10 – 15%, толщину поверхностного слоя с изменёнными физико-механическими свойствами до 20% и относительную площадь прижогов почти на 50 %. При этом дополнительные расходы на древесную золу, используемую в предлагаемой массе для изготовления абразивного инструмента, составляет не более 2 – 3% от стоимости изготовления шлифовального круга.

Таблица 3

Эксплуатационные показатели шлифовальных кругов в зависимости от наличия в них древесной золы

Обрабатываемый материал	Абразивная масса без древесной золы			Абразивная масса с древесной золой		
	Ra, мкм	*ΔH*, мм	*ΔS*, %	*Ra*, мкм	*ΔH*, мм	*ΔS*, %
Сталь 12Х2Н4А	1,32	0,38	16	1,19	0,31	9
Сталь 20ХН2МА	1,29	0,37	15	1,16	0,32	10
Сталь 30ХГСА	1,26	0,34	13	1,14	0,30	10
Сплав ХН62МВКЮ	1,41	0,41	17	1,22	0,34	11
Сплав ХН77ТЮР	1,43	0,44	19	1,24	0,35	13

Новые технологии импрегнирования шлифовальных кругов

Весьма перспективным направлением повышения эффективности шлифования поверхностей деталей машин является импрегнирование абразивного инструмента водными растворами ПАВ. Разработан ряд способов импрегнирования шлифовальных кругов на керамической связке, которые прошли производственные испытания и рекомендуются к широкому внедрению в машиностроительное производство [9; 10]. Для увеличения сроков хранения шлифовальных кругов и существенного повышения их эффективности предложен способ импрегнирования абразивного инструмента [9], включающий пропитку последнего в течение 10 – 15 мин водным раствором, содержащим 20 – 25 г дийодида хрома на литр воды, при комнатной температуре и периодическом встряхивании ёмкости с раствором и импрегнируемым инструментом для фиксации дийодида хрома в поровом пространстве между абразивными зёрнами. В дальнейшем импрегнированный абразивный инструмент подвергается конвективной сушке подаваемым вентилятором воздухом, нагретым до температуры 40 – 50°С. Сушка инструмента осуществляется в течение 1,5 – 2 часов при вращении инструмента с угловой скоростью 0,3 – 0,5 $с^{-1}$.

Исследованиями установлено, что дийодид хрома, с одной стороны, обладая высокими антисептическими свойствами, не позволяет бактериям развиваться в поровом пространстве, увеличивая тем самым срок хранения абразивного инструмента. С другой стороны, в процессе шлифования в зоне контакта абразивных зёрен с обрабатываемым материалом при температуре 550 – 650°С дийодид хрома разлагается с выделением йода, образующего на обработанных поверхностях детали йодиды железа с низким коэффициентом трения. В результате температура в зоне шлифования может быть снижена более чем на 30%.

Испытаниям подвергались стандартные шлифовальные круги (ГОСТ 2424-83) без импрегнирования и прошедшие импрегнирование водным раствором дийодида хрома по предложенной технологии. На круглошлифовальном станке мод. 3М151 обрабатывались валики диаметром 30 мм и длиной 320 мм из сталей 35ХГСА, 20ХН2МА и сплавов ХН62МВКЮ, ХН77ТЮР. Шлифование осуществлялось при скорости резания $V_{кр}$ = 35 м/с, скорости вращения валиков $V_д$ = 0,314 м/с, продольной подаче $S_{пр}$ = 0,02 м/с, подаче врезания $S_{вр}$ = 0,01 мм/дв. ход и числе двойных ходов круга m =4; в качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовался 5-процентный раствор эмульсола Укринол-1. Оценка эффективности процесса шлифования осуществлялась по интенсивности изнашивания используемых кругов J, сроку хранения кругов до потери ими работоспособности L после отработки 5 часов, числу прижогов на обработанной поверхности $N_{пр}$ и их относительной площади ΔS. Результаты испытаний приведены в табл. 4, из анализа которой следует, что импрегнирование шлифовальных кругов водным раствором дийодида хрома позволяет продлить срок хранения бывших в эксплуатации абразивных инструментов практически в 8 раз, в 2 – 2,5 раза увеличить время непрерывной работы круга между переточками и в 1,7 – 2 раза уменьшить относительную площадь прижогов на обработанной поверхности детали при существенном снижении их числа.

Таблица 4

Результаты сравнительных испытаний импрегнированного дийодидом хрома и стандартного шлифовальных кругов

Обрабатываемый материал	Стандартный круг				Импрегнированный круг			
	J, мг/ч	L, лет	$N_{пр}$, шт.	ΔS, %	J, мг/ч	L, лет	$N_{пр}$, шт.	ΔS, %
Сталь 35ХГСА	5,4	0,5	14	25	2,6	4,0	10	12
Сталь 20ХН2МА	5,2	0,5	16	28	2,4	4,0	10	11
Сплав ХН62МВКЮ	8,2	0,4	21	32	3,4	3,5	12	18
Сплав ХН77ТЮР	8,5	0,4	22	34	3,6	3,5	12	20

Однако эффективность импрегнирования шлифовальных кругов существенно повышается, если помещённый в водный раствор ПАВ абразивный инструмент подвергать воздействию ультразвуковых колебаний частотой 16 – 18 кГц и амплитудой 2 – 3 мм в течение 5 – 8 мин [10]. В качестве источника колебаний может быть использован выпускаемый промышленностью генератор серии УЗГ-13-01/22.

Как показали лабораторные и производственные испытания, способ импрегнирования абразивного инструмента с воздействием на него ультразвуковых колебаний в 2,5 – 3 раза сокращает время пропитки инструмента водным раствором ПАВ и в 4 раза - время сушки импрегнированного инструмента при практически неизменных показателях интенсивности изнашивания, шероховатости обработанной поверхности и относительной площади прижогов. При этом на 60 – 70% сокращаются связанные с импрегнированием абразивных инструментов расходы на электроэнергию и более чем в 2 раза снижаются общие затраты на импрегнирование одного шлифовального круга.

Заключение

Приведённый научный обзор разработанных направлений повышения эффективности шлифования поверхностей деталей машин показал целесообразность применения представленных конструкций и составов абразивных инструментов при обработке высоколегированных хромоникелевых сталей и сплавов. Введение в состав абразивной массы кристаллического йода или дийодида хрома позволяет существенно уменьшить шероховатость обработанных поверхностей деталей, величину технологических остаточных напряжений в поверхностном слое, а также число и суммарную площадь прижогов. В результате становится возможным повысить в несколько раз работоспособность деталей, эксплуатируемых в экстремальных условиях. При этом экономический эффект от внедрения представленных в обзоре направлений совершенствования процессов шлифования поверхностей деталей достигается также за счёт увеличения удельного съёма металла абразивным инструментом и повышения его стойкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. на полез. модель 153430 РФ. Составной абразивный круг / В.И. Бутенко. - Бюл. № 20, 2015.
2. Пат. 2319600 РФ. Шлифовальный круг / В.И. Бутенко, Д.И. Диденко. - Бюл. № 8, 2008.
3. Пат. на полез. модель 100744 РФ. Шлифовальный круг / В.И. Бутенко, Л.В. Гусакова, Р.Г. Шаповалов, Е.С. Фоменко. - Бюл. № 36, 2010.
4. Пат. 2201865 РФ. Шлифовальный инструмент / В.И. Бутенко, Д.И. Диденко, Д.С. Дуров. - Бюл. № 10, 2003.
5. Пат. 2395381 РФ. Шлифовальный инструмент / В.И. Бутенко, Д.С. Дуров, Л.В. Гусакова. - Бюл. № 21, 2010.
6. Пат. 2155668 РФ. Масса для изготовления абразивного инструмента / В.И. Бутенко, Д.И. Диденко. - Бюл. № 25, 2000.
7. Пат. 2392109 РФ. Масса для изготовления абразивного инструмента / В.И. Бутенко, Д.С. Дуров, Л.В. Гусакова, Е.С. Фоменко. - Бюл. № 17, 2010.
8. Пат. 2574183 РФ. Масса для изготовления абразивного инструмента / В.И. Бутенко. - Бюл. № 4, 2016.
9. Пат. 2532660 РФ. Способ импрегнирования абразивного инструмента / В.И. Бутенко, Л.В. Гусакова, А.Д. Кулинский. - Бюл. № 31, 2014.
10. Пат. 2574182 РФ. Способ импрегнирования абразивных инструментов / В.И. Бутенко. - Бюл. № 4, 2016.

1. Useful Model Patent 153430 RF. Abrasive Compound Disk / V.I. Butenko. – Bull. № 20, 2015.
2. Pat. 2319600 RF. Abrasive Disk / V.I. Butenko, D.I. Didenko. - Bull. № 8, 2008.
3. Useful Model Patent 100744 RF. Abrasive Disk / V.I. Butenko, L.V. Gusakova, R.G. Shapovalov, E.S. Fomenko. - Bull. № 36, 2010.
4. Pat. 2201865 RF. Polishing Tool/ V.I. Butenko, D.I. Didenko, D.S. Durov. – Bull. № 10, 2003.

5. Pat. 2395381 RF. Polishing Tool / V.I. Butenko, D.S. Durov, L.V. Gusakova. - Bull. № 21, 2010.
6. Pat. 2155668 RF. Mass for Polishing Tool Manufacturing / V.I. Butenko, D.I. Didenko. - Bull. № 25, 2000.
7. Pat. 2392109 RF. Mass for Polishing Tool Manufacturing / V.I. Butenko, D.S. Durov, L.V. Gusakova, E.S. Fomenko. - Bull. № 17, 2010.
8. Pat. 2574183 RF. Mass for Polishing Tool Manufacturing / V.I. Butenko. – Bull. № 4, 2016.
9. Pat. 2532660 RF. Method for Polishing Tool Impregnation / V.I. Butenko, L.V. Gusakova, A.D. Kulinsky. - Bull. № 31, 2014.
10. Pat. 2574182 RF. Method for Polishing Tools Impregnation / V.I. Butenko. - Bull. № 4, 2016.

Статья поступила в редколлегию 4.04.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Ростовского государственного университета путей сообщения Чукарин А.Н.

Сведения об авторах:

Бутенко Виктор Иванович, д. т. н., профессор кафедры «Механика» Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону: e-mail: mkk@egf.tsure.ru.
Гусакова Лиана Валерьевна, к. т. н., доцент кафедры «Основы проектирования машин» Ростовского государственного университета путей сообщения, e-mail: GusakovaLV@mail.ru.
Кулинский Алексей Данилович, к. т. н., доцент, генеральный директор ОАО «Ейский станкостроительный завод», тел.: 8(861-32)-3-06-13.

Butenko Viktor Ivanovich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Mechanics” Institute of Radio-Technical Systems and Management of the Southern Federal University, Rostov-upon-Don, e-mail: mkk@egf.tsure.ru.
Gusakova Liana Valerievna, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Machine Design Fundamentals Rostov State University of Communications, e-mail: GusakovaLV@mail.ru.
Kulinsky Alexey Danilovich, Can.Eng., Director-General of Co. “Yeisk Machine-tool Plant”, Phone: 8(861-32)-3-06-13.

УДК 620.179
DOI: 10.12737/20255

В.Н. Гадалов, А.В. Фролов, В.И. Муравьев, И.В. Ворначева, Т.Н. Розина

УТОЧНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАНДАРТНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ МАРКИ 30ХГСА

Рассмотрена эффективность термической обработки стали марки 30ХГСА. Исследован режим изотермической закалки, способствующий выравниванию дефектной структуры стали, более полному мартенситному превращению и, как следствие, повышению пластических и прочностных свойств.

Ключевые слова: сталь 30ХГСА, термическая обработка, изотермическая закалка, механические свойства, фазовое превращение.

V.N. Gadalov, A.V. Frolov, V.I. Muraviyov, I.V. Vornacheva, T.N. Rosina

EFFICIENCY ADJUSTMENT OF STANDARD THERMAL TREATMENT OF 30HGSA STEEL

The efficiency of thermal treatment of 30HGSA steel is considered. The mode of bainitic hardening contributing to smoothing of steel defective structure a more complete martensitic transformation and, as a consequence, to the increase of plastic and strength properties is considered.

Key words: 30HGSA steel, thermal treatment, bainitic hardening, stress-strain properties, phase change.

Введение

Повышение эффективности технологий термической обработки сталей представляет собой ключевую задачу на пути совершенствования технологий производства продукции машиностроительных предприятий. Так как разработка режимов термической обработки основывается на влиянии фазовых превращений на свойства сталей, то исследование этой зависимости является важной научной и практической задачей. При этом представляется перспективным исследование недостаточно изученной зависимости субструктуры и свойств среднелегированных сталей от процессов фазовых предпревращений, протекающих на границах аустенитного и бейнитного превращений (за исключением самих фазовых превращений).

В связи с изложенным авторами были проведены исследования влияния фазовых превращений и предпревращений во время двойной закалки с высокой скоростью нагрева и кратковременной выдержкой при температуре закалки, а также изотермической закалки с выдержкой в интервале бейнитного предпревращения на субструктуру и механические свойства стали 30ХГСА.

Методика эксперимента

Исследования проводились на трубных образцах из стали 30ХГСА с внутренним диаметром 10 мм, толщиной стенки 1 мм, длиной 15 мм. Химический состав образцов: 0,95 % Mn; 0,95% Cr; 0,9...1,2 % Si; 0,08 % Ni; 0,34 % C. Температуры критических точек [1]: Ac_1=760°C; Ac_3= 830 °C; Ar_3=705 °C ; Ar_1=670 °C ; M_i =352 °C. Физические свойства: удельная теплоемкость C_R =459,5 + 0,06T $\frac{Дж}{Кг \cdot К}$; коэффициент теплопроводности λ=39,251 – 0,0108T $\frac{Вт}{м \cdot к}$; плотность ρ= 7762$\frac{Кг}{м^3}$; коэффициент линейного расширения α= (11,971 + 0,0026T) 10^{-6} $\frac{1}{К}$; модуль нормальной упругости E = 2,2462·10^5(1–48,97·$10^{-5}T$) МПа (T – температура, °C).

Исследовались следующие режимы термической обработки:

- традиционная однократная закалка в воде с 900 °С;
- традиционная закалка в воде с последующим отпуском при 510 °С в течение 1 часа;
- двойная закалка: закалка в воде с 900°С, повторный нагрев в соляной ванне (50% NaCl / 50% KCl) при температуре 900°С в течение 1, 2, 5, 7 и 10 с, повторная закалка в воде;
- изотермическая закалка в щёлочи с 900°С с выдержками 10 с, 30 с, 1 мин, 5 мин и 15 мин при температуре 380°С.

Температура образцов при повторном нагреве определялась аналитически с учётом физических свойств исследуемой стали. Температурно-временные условия повторного нагрева (для двойной закалки) выбирались таким образом, чтобы не допустить рост аустенитного зерна.

Термически обработанные образцы подвергались механическим испытаниям на сплющивание с постоянной скоростью (по ГОСТ 8695-75) на испытательной машине INSTRON 3382K7046. Момент образования трещины определялся с применением метода акустической эмиссии [2]. Кроме испытаний на сплющивание измерялась твёрдость образцов по методу Роквелла, по которой оценивался предел прочности (в соответствии с [3]), а также проводились микроструктурный и электронно-фрактографический анализы.

Результаты экспериментов

Механические свойства исследованных образцов представлены в табл. 1, 2 (P - нагрузка в момент образования трещины, δ_m – деформация (сплющивание) образца в момент образования трещины) и на рис. 1, 2. Результаты металлографических и фрактографических исследований представлены на рис. 3-6.

Как видно из представленных данных (табл. 1, рис. 1, 3, 4), в диапазоне изометрических выдержек 10 с…5 мин наблюдается резкое увеличение пластических свойств материала. В диапазоне изометрических выдержек 30 с…1 мин наблюдается некоторое снижение нагрузки, приводящей к образованию трещины, при неизменной твёрдости. Этот же диапазон изометрических выдержек характеризуется более полным мартенситным превращением (меньшим количеством остаточного аустенита), отсутствием продуктов бейнитного превращения, а также более вязким характером разрушения.

Таблица 1

Зависимость механических свойств образцов из стали 30ХГСА от длительности изотермической выдержки

Режим термообработки	Механические свойства			
	P, кН	δ, мм	HRC	$\sigma_в$, МПа
Непрерывная закалка с 900 °С в воде	6,3	5,1	54	205
Непрерывная закалка с 900 °С в воде, отпуск при 510 °С 1 час	4,5	6,8	37,5	115
Изотермическая закалка с выдержкой 10 с при 380°С	6,4	5,7	53	195
Изотермическая закалка с выдержкой 30 с при 380°С	6,2	8,1	45	150
Изотермическая закалка с выдержкой 1 мин при 380° С	5,8	8,5	45	150
Изотермическая закалка с выдержкой 5 мин при 380° С	5,6	7,8	42	138
Изотермическая закалка с выдержкой 15 мин при 380° С	5,1	6,7	42	138

Таблица 2

Механические свойства образцов из стали 30ХГСА после различных режимов их повторной закалки

Режим термообработки	Механические свойства			
	P, кН	δ, мм	HRC	$\sigma_в$, МПа
Однократная закалка с 900 °С	6,3	5,1	54	2050
Закалка с 900 °С, отпуск при 510 °С 1 час	4,5	6,8	37,5	1150
Двойная закалка, длительность повторного нагрева - 1с	5	7,4	44	1420
Двойная закалка, длительность повторного нагрева – 2с	4,8	6,5	39	1350
Двойная закалка, длительность повторного нагрева – 5с	4	9,6	26	830
Двойная закалка, длительность повторного нагрева – 7с	5,6	4,7	53	1950
Двойная закалка, длительность повторного нагрева – 10с	6,8	5,1	58	2300

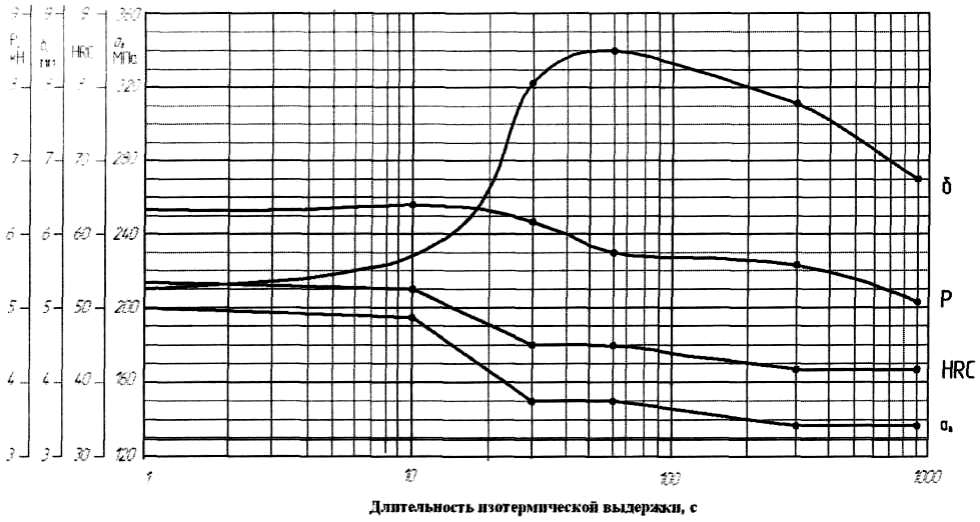


Рис. 1. Зависимость механических свойств стали 30ХГСА от времени изотермической выдержки при закалке

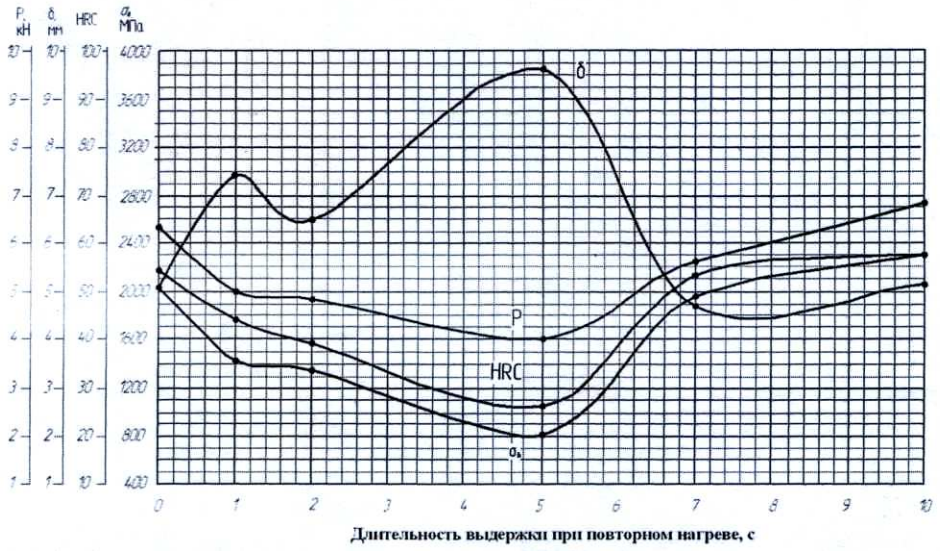


Рис. 2. Зависимость механических свойств стали 30ХГСА от длительности выдержки при повторном нагреве

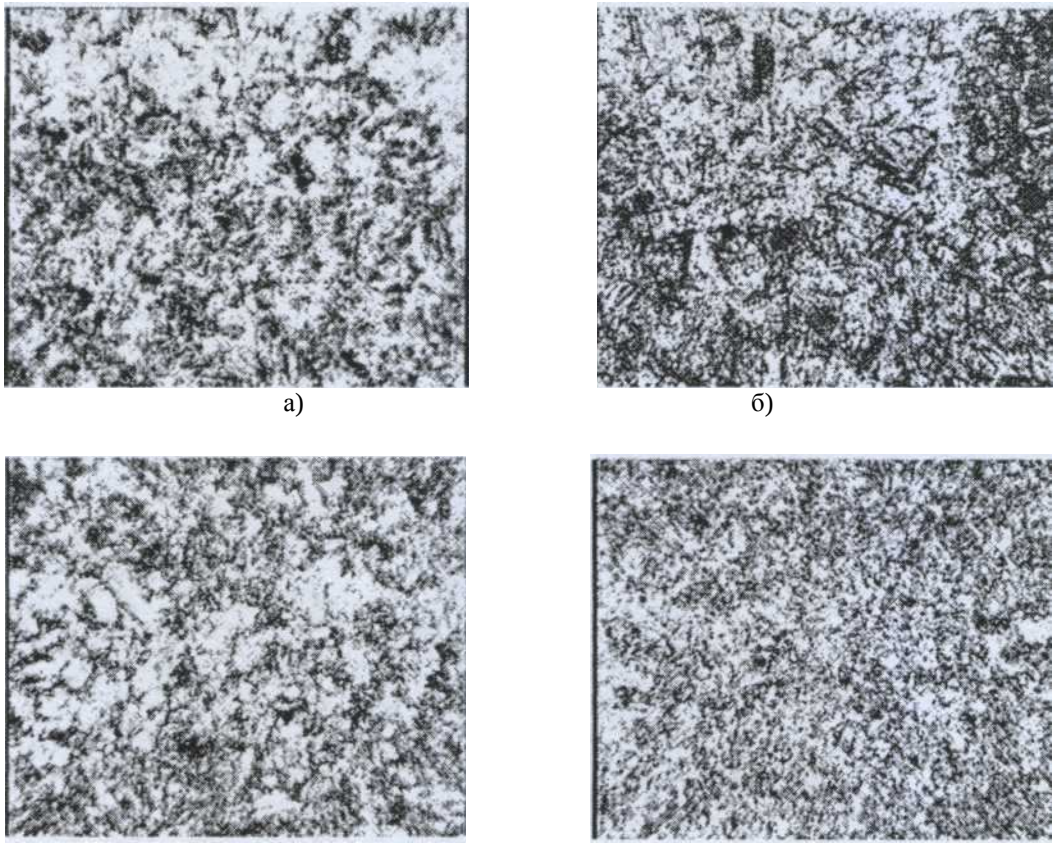
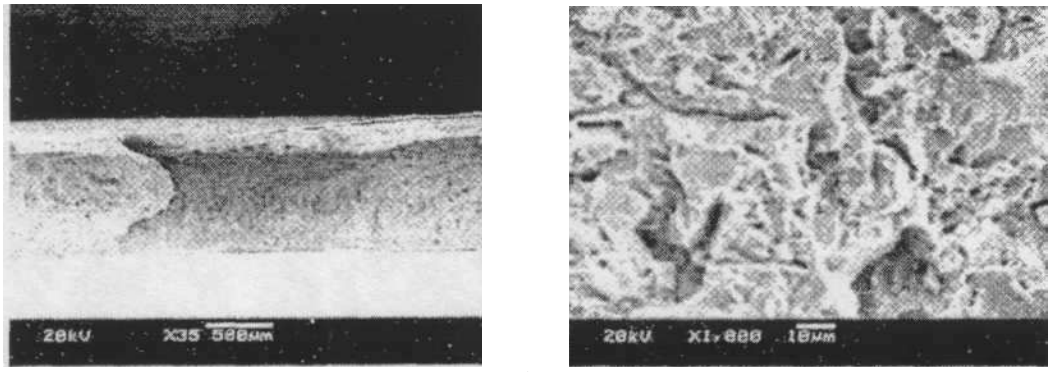


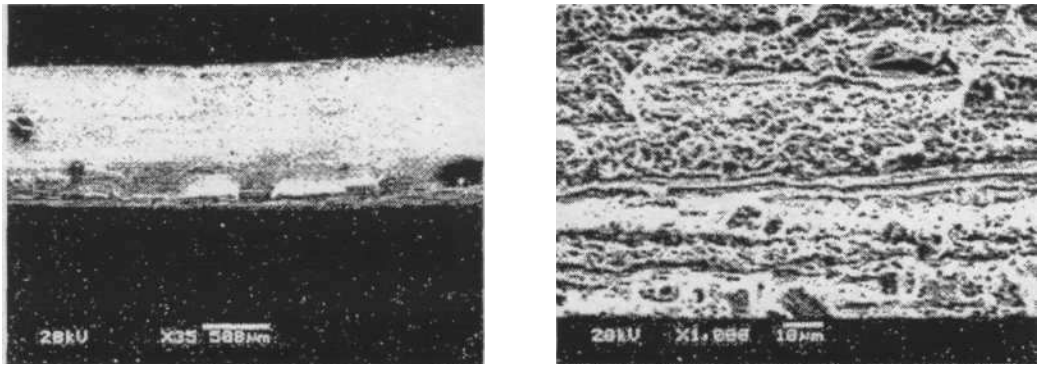
Рис. 3. Микроструктура (х 500) образцов из стали 30ХГСА после непрерывной закалки в воде с 900°С (а) и изотермической закалки с выдержкой при температуре 380°С в течение 10 с (б), 30 с (в) и 15 мин (г)

Во время повторной закалки увеличение выдержки при температуре закалки с 1 до 5 с приводит к снижению прочностных характеристик и твёрдости с одновременным увеличением пластических свойств, что эквивалентно отпуску. Но при выдержке 5 с прочностные характеристики в среднем на 15 % ниже аналогичных характеристик, полученных после традиционной закалки с отпуском, а пластические - выше в среднем на 40 %. Режим двойной закалки, эквивалентный отпуску по механическим характеристикам, соответствует выдержке в интервале 2...5 с. Дальнейшее увеличение выдержки приводит к повышению прочностных и снижению пластических свойств, т. е. к эффектам, соответствующим повторной закалке. Но при этом прочностные свойства в среднем на 8 % превышают аналогичные характеристики, получаемые при традиционной закалке, при одних и тех же пластических характеристиках.

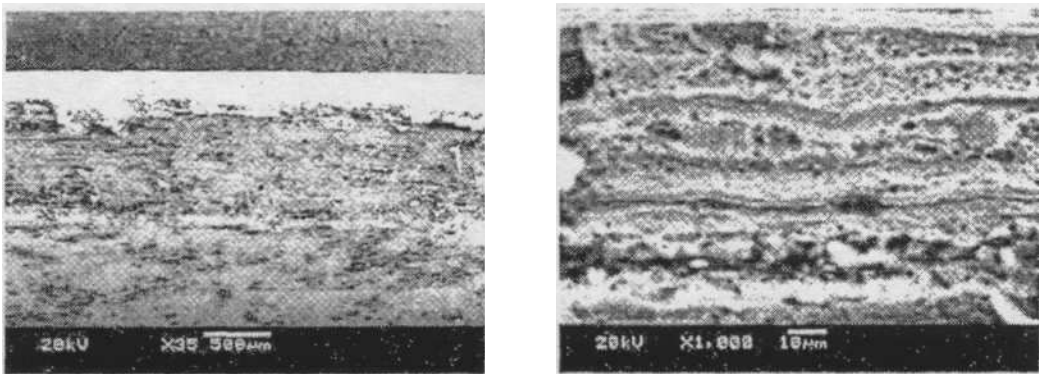
Повторная быстрая аустенизация приводит к существенному измельчению зерна. Изменение текстуры прессового происхождения в изломе труб зависит от времени аустенизации и практически исчезает при выдержке 10 с. Морфология поверхности разрушения образца с выдержкой при повторной аустенизации 10 с характеризуется изломом камневидного типа, что соответствует межзёренному разрушению, как и для традиционно закалённого образца (с той лишь разницей, что величина зерна более чем в 7 раз меньше и составляет 3...5 мкм). Кроме того, в начале и конце разрушения образца наблюдаются скосы; сколов, как на рис. 5 а, не наблюдается. Морфология поверхности разрушения образцов с выдержкой при повторной аустенизации менее 10 с характеризуется квазикристаллическим изломом. Величина зерна - порядка 3...5 мкм, сохранилась текстура. И начале и конце разрушения на поверхности излома наблюдаются скосы, свидетельствующие о вязкости разрушения.



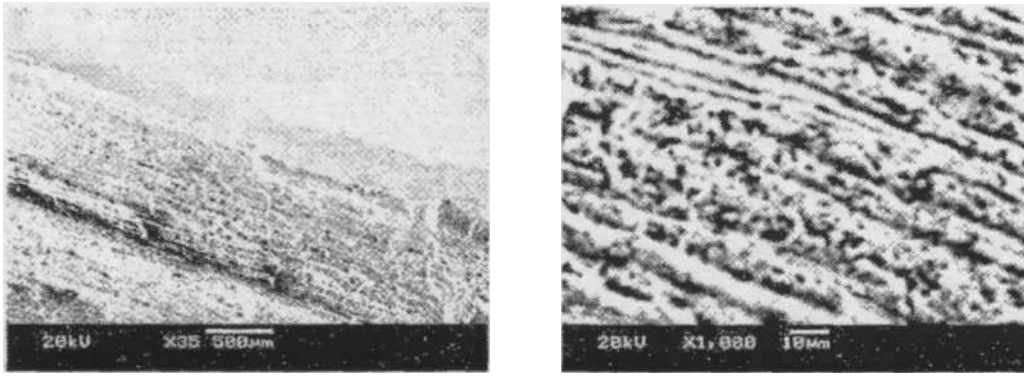
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Электронная фрактография излома образцов из стали 30ХГСА, испытанных на сплющивание после изотермической закалки с выдержкой при температуре 380°С в течение: а – 10 с; б – 30 с; в – 60 с; г – 15 мин

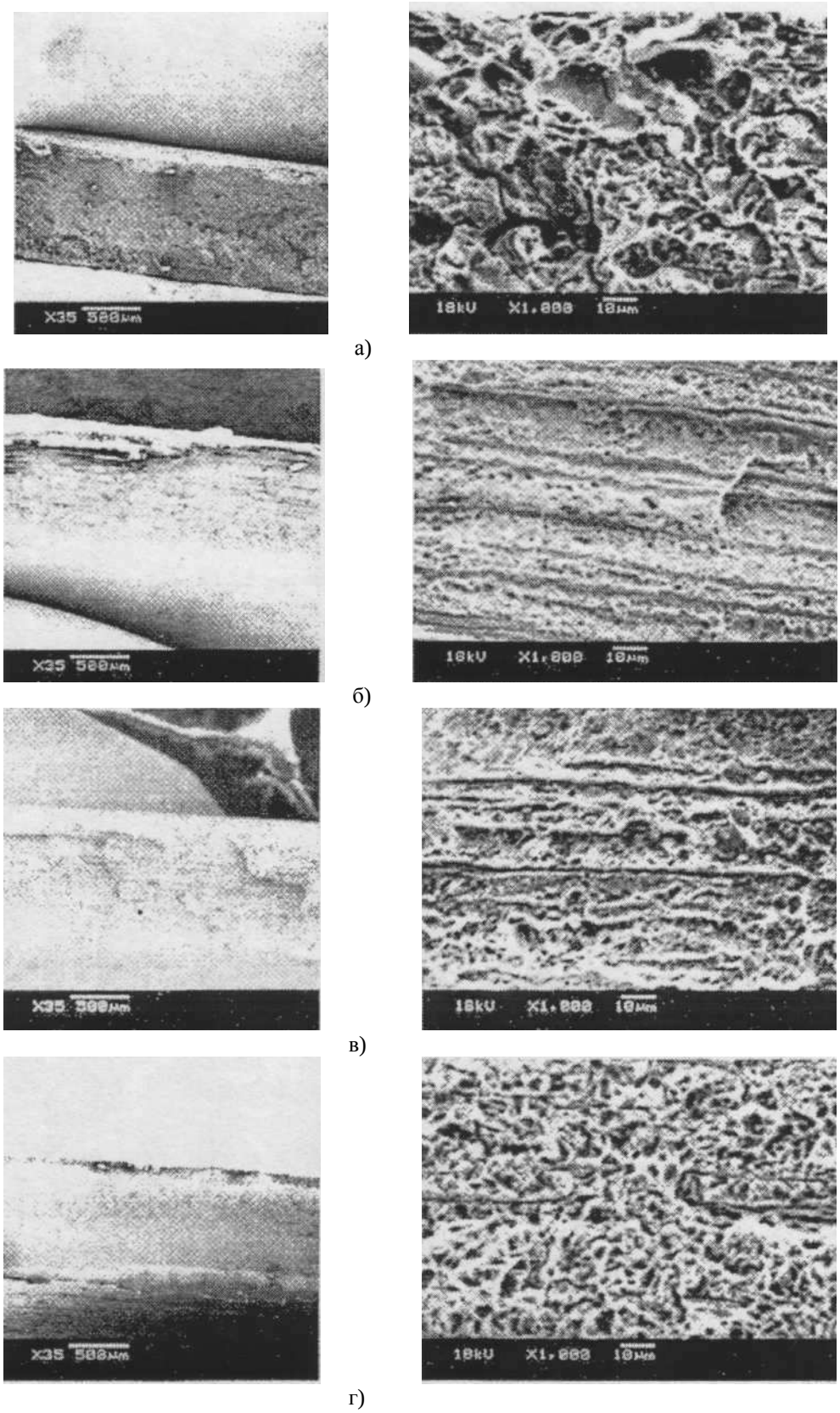
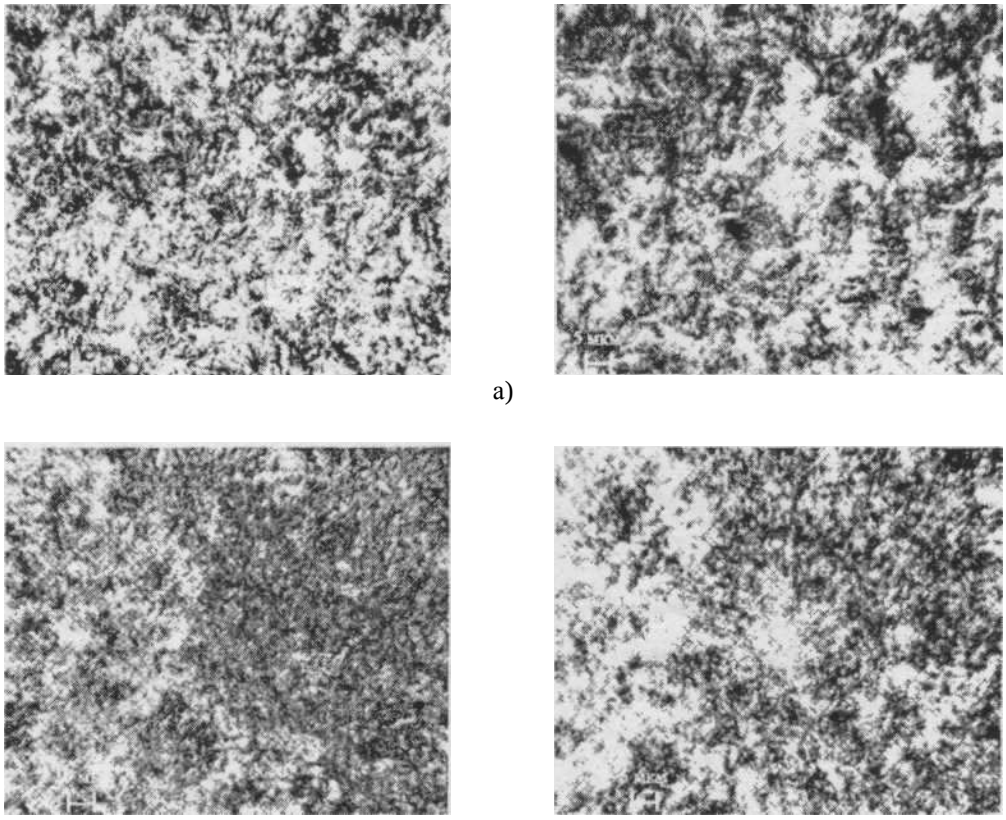


Рис. 5. Электронная фрактография излома трубных образцов из стали 30ХГСА, испытанных на сплющивание после закалки в воде с 900°С (а) и повторной закалки в воде при нагреве до 900°С в течение 1 с (б), 5 с (в), 10 с (г)



а)

б)

Рис. 6. Микроструктура трубных образцов из стали 30ХГСА после закалки в воде с 900°С (а) и повторной закалки в воде при нагреве до 900°С в течение 1 с (б)

Заключение

Исследованный режим изотермической закалки стали 30ХГСА с выдержкой в области бейнитного предпревращения (30...60 с при температуре 380°С) способствует выравниванию дефектной структуры стали, более полному мартенситному превращению и позволяет увеличить пластические свойства сплава до 25 % и прочностные характеристики до 37 % по сравнению с традиционным режимом термической обработки. Представляет научно-практический интерес более тщательное изучение влияния параметров изотермической выдержки в районе температуры бейнитного предпревращения и времени выдержки (1...300 с) на структуру и свойства стали 30ХГСА, а также проверка исследуемого эффекта на других марках сталей.

Технологии многократной закалки могут быть использованы не только в качестве альтернативы классическому отпуску, требующей меньших временных затрат, но и в качестве перспективного метода получения улучшенного комплекса механических свойств стальных изделий. Эффекты, обнаруженные при исследовании двойной закалки стали 30ХГСА, нуждаются в более тщательном изучении (особенно вблизи температур фазовых превращений и выдержек при нагреве до 5 с), проверке на других типах конструкционных сталей и теоретическом обосновании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марочник сталей и сплавов / под ред. В.Г. Сорокина. - М.: Машиностроение, 1989.-640 с.
2. Семашко, Н.А. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н.А. Семашко, В.И. Шпорт, Б.Н. Марьин [и др.]. - М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
3. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. - М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

1. Steel and Alloys Reference Book / under the editorship of V.G. Sorokin. - M.: Mechanical Engineering, 1989.- pp. 640.
2. Semashko, N.A. Acoustic Emission in Experimental Material Science / N.A. Semashko, V.I. Sport, B.N. Maryin et al. - M.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 240.
3. Gulyaiev, A.P. Metal Science / A.P. Gulyaiev. - M.: Metallurgy, 1986. – pp. 544.

Статья поступила в редколлегию 4.04.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Курской государственной сельскохозяйственной академии им. И.И.Иванова Крупчатников Р.А.

Сведения об авторах:

Гадалов Владимир Николаевич, д.т.н., профессор Юго-Западного государственного университета, г. Курск, тел.: 8-908-128-49-70, e-mail: Gadalov-VN@yandex.ru.
Фролов Алексей Валерьевич, к.т.н., доцент Комсомольского-на-Амуре государственного университета.
Муравьев Василий Илларионович, д.т.н., профессор Комсомольского-на-Амуре государственного университета.
Ворначева Ирина Валерьевна, аспирант Юго-Западного государственного университета, г. Курск, тел.: 8-960-677-67-68, e-mail: vornairina2008@yandex.ru.
Розина Татьяна Николаевна, аспирант Юго-Западного государственного университета, г. Курск, тел.: (4712) 22-26-69.

Gadalov Vladimir Nikolaievich, D.Eng., Prof. South-Western State University, Kursk, Phone: 8-908-128-49-70, e-mail: Gadalov-VN@yandex.ru.
Frolov Alexey Valerievich, Can.Eng., Assistant Prof., Komsomolsk-upon-Amur State University
Muraviyov Vasily Illarionovich, D.Eng., Prof., Komsomolsk-upon-Amur State University
Vornachyova Irina Valerievna, Post graduate student South-Western State University, Kursk Phone: 8-960-677-67-68, e-mail: vornairina2008@yandex.ru.
Rozina Tatiana Nikolaievna, Post graduate student South-Western State University, Kursk Phone: (4712) 22-26-69.

УДК 621.757
DOI: 10.12737/20265

Е.А. Миронова

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЗАТЯЖКИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ МНОГОШПИНДЕЛЬНЫМИ ГАЙКОВЕРТАМИ С ПАССИВНОЙ АДАПТАЦИЕЙ ПО МОМЕНТУ

Обоснована точность моментов затяжки резьбовых соединений многошпиндельным гайковертом с пассивными средствами адаптации.

Ключевые слова: многошпиндельный гайковерт, муфта предельного момента, дифференциальный механизм, погрешность момента затяжки, пассивная адаптация.

E.A. Mironova

STABILITY ENSURING IN THREADED CONNECTION TIGHTENING BY MULTISPINDLE NUTRUNNERS WITH PASSIVE ADAPTATION ON MOMENT

The necessity of the creation of a multispindle nutrunner ensuring a relatively stable moment of tightening in group threaded connections is substantiated.

A kinematic scheme of a multispindle nutrunner with passive means of adaptation on a moment on the basis of a differential mechanism use is offered.

The analysis is given of a moment error at multispindle nutrunner tightening on the basis of passive adaptation.

Key words: multispindle nutrunner, coupler of limit moment, differential mechanism, tightening moment error, passive adaptation.

Введение

В тех случаях, когда необходимо одновременное прижатие скрепляемых деталей групповыми резьбовыми соединениями и требуется высокая точность момента затяжки, можно предложить следующую кинематическую схему многошпиндельного завинчивающего устройства с пассивной адаптацией.

Кинематическая схема гайковерта

Устройство (рисунок) состоит из электродвигателя, планетарного редуктора, муфты предельного момента, дифференциального механизма, зубчатых передач и шпинделей.

От электродвигателя 1 вращение передается через планетарный редуктор 2 на муфту предельного момента с полумуфтами 3, 4, а затем на ось дифференциального механизма, где движение разделяется на два. Дифференциальный механизм служит для выравнивания моментов завинчивания и затяжки, обеспечивая адаптацию (слежение) по моменту.

Первое вращение передается через ось 20 дифференциала, которая жестко связана с осью 7 сателлита 8, на сдвоенную шестерню 5, 6, взаимодействующую с колесом 21, и далее через зубчатые передачи 12, 13 и 14, 15 на шпиндель 18 к патрону 19.

Второе вращение от оси 20 через ось 7 передается на сателлит 22 к сдвоенной шестерне 9, 10, взаимодействующей с колесом 11, а затем через зубчатые передачи 12, 13 и 14, 15 на шпиндель 16 к патрону 17.

Как только суммарный момент сопротивления вращению будет равен моменту срабатывания муфты предельного момента, гайковерт остановится.

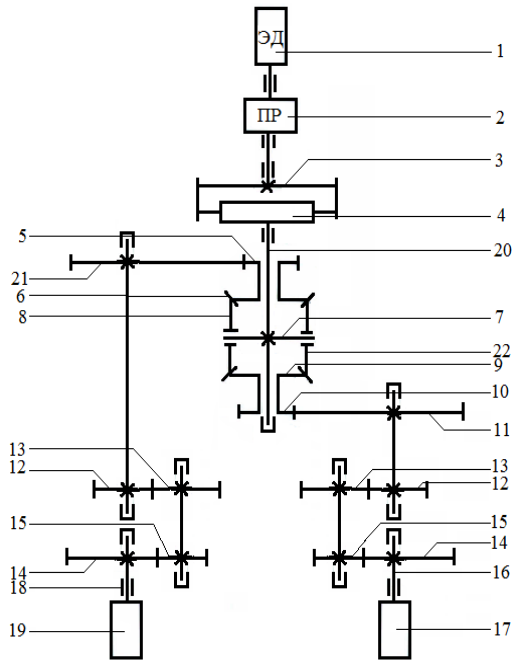


Рис. Двухшпиндельный гайковерт на основе муфты предельного момента и дифференциального механизма

Погрешности моментов затяжки

В процессе затяжки резьбовых соединений гайковертом с пассивной адаптацией возникает погрешность момента затяжки, которая зависит от следующих факторов: неточности срабатывания муфты предельного момента; чувствительности дифференциального механизма; непостоянства момента сопротивления в резьбах.

В работе [2] приведено математическое описание процесса завинчивания и затяжки групповых резьбовых соединений с адаптацией по моменту, уточненное уравнение которого имеет вид

$$J_z\ddot{\phi} = M_{кр} - \frac{F_б E_б p}{2\pi l_б}\left[\frac{\mu_T}{3}\frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{d_2}{2} tg\left(\frac{p}{\pi d_2} + \rho\right)\right]\phi -$$

$$-\frac{F_б E_б p}{2\pi l_б}\left[\frac{\mu_T}{3}\frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2} + \frac{d_2}{2}\mathrm{tg}\left(\frac{p}{\pi d_2} + \rho\right)\right]\phi_0,$$

где J_z – приведенный к оси шпинделя момент инерции вращающихся элементов гайковерта; $M_{кр}$ – крутящийся момент, который действует на резьбовое соединение; $F_б$ – площадь сечения тела болта; $E_б$ – модуль упругости материала болта; $l_б$ – длина растягиваемой части болта; p – шаг резьбы; $\mu_т$ – коэффициент трения на торце головки болта; D – наружный диаметр опорной поверхности головки болта (равен размеру под ключ головки болта); d_0 – диаметр тела болта; d_2 – средний диаметр резьбы; ρ – угол трения в резьбе.

Для случая, когда коэффициенты вязкого трения и трения скольжения, а также коэффициент трения на торце головки болта и угол трения в резьбе изменяются на 20%, величина погрешности момента, зависящая от непостоянства сопротивления в резьбах, составляет около 25% от номинального значения.

Погрешность переключения дифференциального механизма за счет его чувствительности составляет 10-15% от номинального значения [3].

Момент переключения муфты предельного момента, согласно [1], выражается формулой

$$M_{мпм} = \frac{Q_в(D_0 + D_1)}{4\left[f'\frac{D_0 + D_1}{2d} + \mathrm{tg}(\alpha + \varphi')\right]},$$

где $Q_в$ – осевая сила срабатывания муфты предельного момента; D_0 – наружный диаметр муфты; D_1 – внутренний диаметр

муфты; d – диаметр вала муфты; α – угол скоса зубьев; φ' – угол трения; f' – коэффициент трения.

Тогда погрешность момента переключения муфты предельного момента, согласно методу линейных ошибок, примет вид

$$\delta M_{\text{мпм}} = \frac{\partial M_{мпм}}{\partial Q_в}\delta Q_в + \frac{\partial M_{мпм}}{\partial D_0}\delta D_0 + \frac{\partial M_{мпм}}{\partial D_1}\delta D_1 + \frac{\partial M_{мпм}}{\partial d}\delta d + \frac{\partial M_{мпм}}{\partial f'}\delta f' + \frac{\partial M_{мпм}}{\partial \alpha}\delta\alpha + \frac{\partial M_{мпм}}{\partial \phi'}\delta\phi',$$

где $\frac{\partial M_{\text{мпм}}}{\partial Q_{\text{в}}}$, $\frac{\partial M_{\text{мпм}}}{\partial D_0}$, …, $\frac{\partial M_{\text{мпм}}}{\partial \varphi'}$ – коэффициенты влияния данных параметров на погрешность момента переключения муфты предельного момента; $\delta Q_{\text{в}}$, δD_0, …, $\delta\varphi'$ – отклонения данных параметров.

Исходя из допустимых значений отклонений этих параметров гайковерта [2] и с учетом приведения к оси шпинделя погрешность составит около 0,76% от номинального значения.

С учетом всего перечисленного общая погрешность момента δM будет равна 48,6 кг·м, а относительная погрешность составит 27 % от номинала.

Заключение

Стоит отметить, что одним из достоинств предложенной кинематической схемы многошпиндельного гайковерта является то, что за счет пассивной адаптации относительная погрешность моментов затяжки резьбовых соединений между шпинделями не превышает 10-15%.

Повысить точность момента возможно путем установки муфт предельного момента после дифференциального механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воркуев, Д.С. Разработка семейства высокоточных многошпиндельных гайковертов нового класса на основе одного привода: монография / Д.С. Воркуев, Ю.З. Житников; под общ. ред. Ю.З. Житникова. – М.: Машиностроение, 2009. – 204 с.
2. Миронова, Е.А. Адаптивная затяжка групповых резьбовых соединений по моменту / Е.А. Миронова // Сборка в машиностроении, приборостроении. –2015. – №5. – С. 17-19.
3. Нарбут, А.Н. Автомобили: Рабочие процессы и расчет механизмов и систем: учеб. для студентов высш. учеб. заведений/ А.Н. Нарбут. – 2-е изд., испр. – М.: Академия, 2008. – 256с.

1. Vorkuyev, D.S. Development of New Class High-accuracy Multispindle Nutrunners Family Based on One Drive: Monograph / D.S. Vorkuyev, Yu.Z. Zhitnikov; under the general editorship of Yu.Z. Zhitnikov. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 204.
2. Mironova, E.A. Adaptive tightening of group threaded joints on a moment / E.A. Mironova // Assemblage in Instrument-making. –2015. – №5. – pp. 17-19.
3. Narbut, A.N. Motor Cars: Working Processes and Computation of Mechanisms and Systems: Textbook for college students/ A.N. Narbut. – 2-d Ed., revised. – M.: Academy, 2008. – pp. 256.

Статья поступила в редколлегию 10.03.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Ковровской государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева Житников Ю.З.

Сведения об авторах:

Миронова Елена Александровна, доцент кафедры «Высшая математика» Ковровской государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева, тел.: 8-915-798-55-13, e-mail: elena_mir_a@mail.ru.

Mironova Helen Alexandrovna, Assistant Prof. of the Dep. “Higher Mathematics” Degtyaryov State technological cademy, Phone: 8-915-798-55-13.

УДК 621.924
DOI: 10.12737/20266

Г.В. Серга, В.А. Лебедев, К.А.Белокур, Д.Я.Яковлев

РОТОРНО-ВИНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

Предложены технические решения по повышению производительности технологических систем отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей на основе применения винтовых контейнеров. Представлены результаты оценки их эффективности исходя из конструктивных особенностей.

Ключевые слова: технологическая система, винтовой контейнер, виброактиватор, пружина растяжения, отделочная обработка, упрочняющая обработка, масса загрузки.

G.V. Serga, V.A. Lebedev, K.A. Belokur, D.Ya. Yakovlev

ROTARY-HELICAL TECHNOLOGICAL SYSTEMS FOR PARTS MACHINING

The technical solutions for efficiency increase of technological systems for parts finishing and strengthening based on the use of screw containers are offered. The essence is revealed, design peculiarities and technological possibilities of a rotor-helical technological system with a vibro-container and an adjusting spring and a rotor-helical technological system with a rotating container are described. The results of experimental researches of granular material motion in a screw container with the use of three-factor experiment planning are shown. The assessment of the screw containers efficiency application reasoning from their design peculiarities is given.

Key words: technological system, screw container, vibratory activator, extension spring, finishing, strengthening, load mass.

Введение

В настоящее время для выполнения отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей на предприятиях машиностроительного комплекса широко применяют устройства с виброактиватором. Опыт практического применения вибростанков показывает, что они эффективно работают тогда, когда рабочая камера вибростанка колеблется с амплитудой 0,5…8 мм. Превышение указанных амплитудно-частотных характеристик приводит к значительному снижению сроков их эксплуатации. Кроме того, при использовании вибростанков для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей серьёзной проблемой, требующей своего разрешения, являются вопросы, связанные с загрузкой, выгрузкой деталей из рабочей зоны и их последующей транспортировкой. С целью исключения этого противоречия, а также расширения диапазона амплитудно-частотных характеристик технологического оборудования предлагается использовать для выполнения отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей технологические системы с рабочими органами в виде винтовых контейнеров [1 - 4].

Роторно-винтовая технологическая система с виброконтейнером и регулировочной пружиной

Данная технологическая система выполнена в виде винтового контейнера со смонтированной внутри пружиной растяжения.

Роторно-винтовой станок (рис. 1) содержит контейнер 1, смонтированный горизонтально или под углом на плите 2, которая с помощью упругих элементов 3 жестко закреплена на основании 4. К плите 2 прикреплен вибратор 5. Продольное перемещение от загрузки к выгрузке в винтовом контейнере 1 обеспечивается тем, что количество винтовых поверхностей и винтовых канавок основного направления (три) превышает количество винтовых ка-

навок противоположного направления (две).

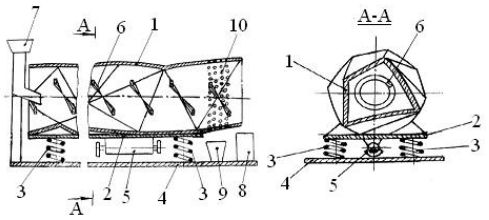


Рис. 1. Роторно-винтовой станок с виброконтейнером с пружиной растяжения

Для обеспечения дополнительного перемещения гранул рабочих сред и обрабатываемых деталей роторно-винтовой станок, точнее винтовой контейнер 1, оборудован пружиной растяжения 6. В зависимости от характеристик обрабатываемых деталей, гранул рабочих сред и продолжительности процесса устанавливается такой шаг пружины, который отвечает оптимальным режимам обработки. Например, если требуется малое время обработки, то уменьшается шаг пружины растяжения 6. При обработке с большой продолжительностью в винтовом контейнере 1 шаг витков пружины растяжения 6 увеличивается. В нужном положении пружину 6 фиксируют специальными приспособлениями (на чертежах не показано).

Станок снабжен средством для загрузки 7, закрепленным на основании 4, и средством для разгрузки 8, а также бункером для отходов обработки 9. Над бункером 9 в контейнере 1 выполнены отверстия 10 для удаления отходов обработки (облой, металл заусенцев, окалина и т.п.).

Основным рабочим органом роторно-винтового станка является винтовой контейнер 1, изготовленный из трех прямоугольных полос 11, 12, 13 (рис. 2а) с образованием по наружному диаметру контейнера трех винтовых линий 14-15-16-17-18-19, 20-21-22-23-24, 25-26-27-28-29, а по внутреннему диаметру - трех ломаных винтовых канавок K_1 (14-15-16-17-18-19), K_2 (20- 21-22-23-24), K_3 (25-26-27-28-29) с внутренним углом 70° (рис. 2б). При этом по длине винтового контейнера 1 каждое поперечное (проходное) сечение отличается от предыдущего не только формой (рис. 2в), но и их расположением относительно друг друга. Меняется также площадь проходного сечения, что нарушает стационарность движения гранул рабочих сред и обрабатываемых деталей, увеличивает интенсивность их взаимодействия, расширяет технологические возможности. В такой конструкции винтового контейнера 1 по внутреннему диаметру образованы три ломаные винтовые канавки основного направления K_1 (14-15-16-17-18-19), K_2 (20-21-22-23-24), K_3 (25-26-27-28-29) с внутренним углом 70° и шагом S (рис. 2а). Эти канавки не только способствуют перемещению гранул рабочих сред и обрабатываемых деталей от загрузки к выгрузке, но и увеличивают интенсивность их взаимодействия.

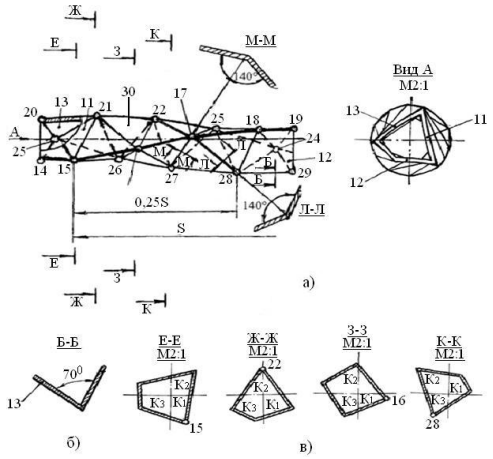


Рис. 2. Контейнер роторно-винтового станка:
а - контейнер; б - сечение Б-Б;
в - сечения Е-Е, Ж-Ж, З-З, К-К

Роторно-винтовой станок представленной конструкции работает следующим образом. Возмущающая сила вращающегося виброактиватора 5 через плиту 2 и стенки винтового контейнера 1 передается гранулам рабочих сред и обрабатываемым деталям (рис. 1), которые загружаются непрерывным потоком с помощью средства для загрузки 7. Под влиянием вибрации гранулы рабочих сред и обрабатываемые детали совершают вращательное движение – циркуляционное движение в плоскостях, перпендикулярных продольной оси винтового контейнера 1. Радиальное движение гранул рабочих сред и обрабатываемых деталей (масс загрузки) обеспечивается ломаными винтовыми канавками основного направления 14-15-16-17-18-19, 20-21-22-23-24, 25-26-27-28-29 с внутренним углом 70° и шагом S, а также ломаными вин-

товыми поверхностями основного направления - свернутыми и изогнутыми полосами 11, 12, 13, треугольные грани которых (в виде равносторонних треугольников 30), встречаясь с гранулами рабочих сред и обрабатываемыми деталями, совершающими под воздействием вибрации вращательное движение, направляют их в сторону выгрузки. Дополнительное движение гранул рабочих сред и обрабатываемых деталей (масс загрузки) обеспечивается витками неподвижно закрепленной пружины 6. При этом массы загрузки движутся вдоль винтовых навивок пружины растяжения 6, обеспечивая им дополнительное перемещение. Частота движений и соударений масс загрузки определяется не только частотой виброактиватора и количеством граней 30 по периметру винтового контейнера 1, но и количеством витков и шагом пружины растяжения 6, смонтированной стационарно (неподвижно) внутри контейнера, которая увеличивает интенсивность циркуляции масс загрузки, частоту взаимодействия гранул рабочих сред и обрабатываемых деталей, создает противопотоки масс загрузки, повышает производительность отделочно-зачистной обработки деталей. Таким образом, массы загрузки совершают сложное пространственное движение и выгружаются из контейнера 1 в средство для разгрузки 8. Отходы обработки через отверстия 10 выводятся из контейнера 1 в бункер для отходов 9.

Роторно-винтовая технологическая система с вращающимся контейнером

Предлагаемая конструкция роторно-винтовой технологической системы для отделочно-зачистной или упрочняющей обработки деталей состоит из станины 1, выполненной в виде сварной рамы (рис. 3).

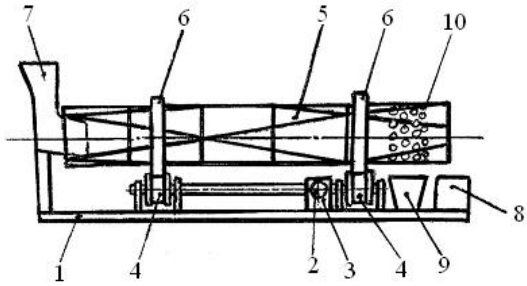


Рис. 3. Роторно-винтовой станок

На станине закреплен привод главного движения, состоящий из электродвигателя 2, редуктора 3 и четырех роликовых опор 4. Винтовой контейнер 5 снабжен двумя ободами 6, которые опираются на роликовые опоры 4 с ребордами. На станине 1 смонтированы средства для загрузки 7 и разгрузки 8, а также бункер 9 для отходов. Над бункером 9 в контейнере 5 выполнены отверстия 10 для удаления отходов (облой, металл заусенцев, окалина и т.п.).

Рабочий орган роторно-винтового станка - контейнер 5, представленный на рис. 4, изготовлен из секций 11, смонтированных из двух подсекций, например 12 и 13, выполненных из трех и более попеременно соединенных между собой боковыми сторонами равнобедренных трапеций 14 и равнобедренных треугольников 15 (на рис. 4 одна из равнобедренных трапеций 14 и один из равнобедренных треугольников 15 выделены двойными линиями), основания которых в подсекциях расположены в разные стороны.

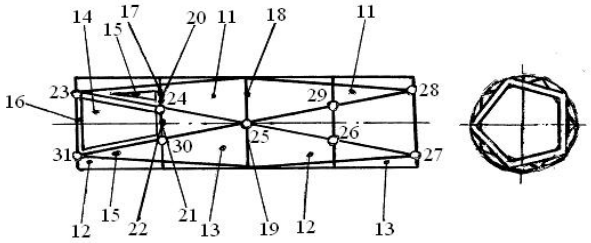


Рис. 4. Общий вид контейнера роторно-винтового станка

В подсекции 12 основание 16 трапеции 14 и основание 17 треугольника 15 расположены в разные стороны. При этом секции соединены между собой большими основаниями трапеций 18, 19 (рис. 2). Подсекции соединены в секцию так, что основания 17 равнобедренных треугольников подсекции 12 присоединены к верхнему основанию 20 равнобедренных трапеций подсекции 13, а основания 21 равнобедренных треугольников подсекции 13 присоединены к верхнему основанию 22 равнобедренных трапеций подсекции 12

(рис. 4). В результате такой последовательной сборки элементов стенок контейнера 5 по периметру образуются пять правых и пять левых ломаных винтовых линий с одинаковым шагом.

Роторно-винтовой станок с вращающимся контейнером работает следующим образом. Во вращающийся контейнер 5 станка через средство для загрузки 7 беспрерывно загружаются рабочая среда и подлежащие обработке детали. При вращении контейнера 5 рабочая среда и обрабатываемые детали совершают движение по винтовым канавкам и выгружаются из него в средство 8. Отходы обработки через отверстия 10 выводятся в бункер для отходов 9.

Таким образом, при вращении контейнера 5 гранулы абразивных сред и обрабатываемые детали захватываются внутренней винтовой поверхностью и поднимаются вверх в направлении вращения. По достижении определенной высоты под действием гравитационных сил и образовавшегося угла естественного откоса абразивные гранулы и обрабатываемые детали движутся навстречу друг к другу под определенными углами и к стенкам вращающегося контейнера 5 и перемещаются в сторону выгрузки. Так как поверхность контейнера непрерывна, то непрерывен и процесс движения последующих порций обрабатываемых деталей и абразивных гранул, которые поднимаются вверх и падают вниз, движутся под разными углами. Поскольку плоские элементы внутренней поверхности контейнера расположены под углом друг к другу, то каждая порция абразивных гранул и обрабатываемых деталей перемещается по своему вектору направления в сторону выгрузки, что в значительной степени интенсифицирует процесс взаимодействия гранул и деталей друг с другом и со стенками винтового контейнера 5.

При такой конструкции контейнера 5 значительно расширен диапазон изменений результирующих векторов перемещений гранул абразивной среды и обрабатываемых деталей. Каждая абразивная гранула и обрабатываемая деталь движутся по разным векторам направления, что обеспечивает большую вероятность столкновений в начальный момент отрыва их от стенок контейнера, где они обладают определенным запасом кинетической энергии. Благодаря этому обеспечивается интенсификация процесса обработки деталей.

Известно, что на величину скорости V продольного перемещения обрабатываемых деталей и гранул абразивной среды в контейнере 5 существенно влияет изменение коэффициента заполнения K_v [3]. С целью определения оптимальной величины K_v для роторно-винтового станка проведены опыты при изменении угла наклона Θ винтового контейнера ($\Theta=4\ldots7^0$), результаты которых представлены в виде номограмм (рис. 5). Эти исследования показали, что оптимальным значением коэффициента заполнения можно считать K_v=0,5…0,6.

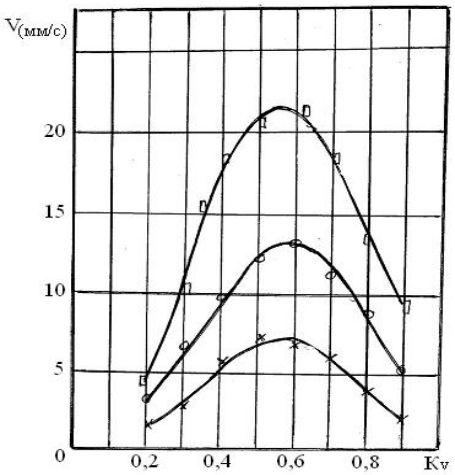


Рис. 5. Зависимость скорости перемещения масс загрузки в винтовом контейнере V от коэффициента заполнения K_v: □-Θ =7^0; ○-Θ =5^0; x-Θ =4^0

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований движения сыпучих материалов в винтовом контейнере с использованием планирования трехфакторного эксперимента.

В качестве факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на производительность и качество обработки, были выбраны коэффициент заполнения K_V и угол наклона Θ винтового контейнера. Коэффициент заполнения контейнера изменялся в пределах от 0,3 до 0,7.

В результате математической обработки экспериментальных данных получе-

но следующее уравнение регрессии в канонической форме для скорости перемещения обрабатываемых деталей в контейнере:

$$Y - 23{,}49 = -44{,}6x_1^2 + 74{,}69x_2^2.$$

Из полученного уравнения следует, что поверхность отклика – гиперболоид (рис.6), а ее центр - минимакс, поскольку коэффициенты уравнения имеют разные знаки. Гиперболы вытянуты по той оси, которой соответствует меньшее по абсолютной величине значение коэффициента в каноническом уравнении.

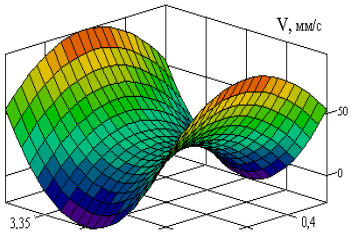


Рис. 6. Поверхность зависимости скорости перемещения масс загрузки в винтовом контейнере от коэффициента заполнения и угла его наклона

Рассмотрение двухмерного сечения плоскостью (рис. 7) показало, что расположение элементов скорости перемещения в области эксперимента соответствует поверхности типа «сходящиеся гребни». Из рис. 7 можно сделать вывод, что изменение значения x_1 в пределах эксперимента влияет на скорость перемещения по закону параболы, т.е. с увеличением коэффициента заполнения от центра плана скорость перемещения падает, а при увеличении значения угла наклона винтового контейнера (x_2) скорость перемещения возрастает.

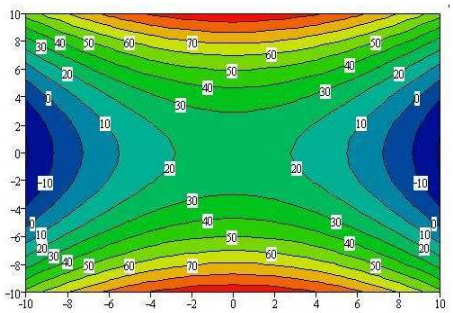


Рис. 7. Двухмерное сечение поверхности зависимости скорости перемещения масс загрузки в винтовом контейнере от коэффициента заполнения и угла его наклона

Анализ накопленных результатов аналитических и экспериментальных исследований позволил сделать предположение о наличии в винтовых контейнерах признаков, которые характеризуют только их конструктивные особенности и одинаковы для всех условий работы. Поэтому целесообразно провести поиск их универсальных характеристик. С этой целью проведено исследование движения масс загрузки. Выполнен анализ процесса их движения внутри винтового контейнера в поперечном и продольном его сечениях. Результаты исследований показали, что изменение скорости продольного движения частиц масс загрузки можно однозначно описать полиномом

$$P_4 = a_0 x^4 + a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x + a_4,$$

который может быть представлен в виде

$$P = AP_0.$$

Здесь А – коэффициент, зависящий от условий работы винтового контейнера (геометрических размеров, массы частиц обрабатываемых деталей и рабочих частиц, степени заполнения контейнера); $P_0 = x^4 + в_1x^3 + в_2x^2 + в_3x + в_4$, где $в_1$, $в_2$, $в_3$, $в_4$ – коэффициенты, которые характеризуют только класс винтового контейнера, т.е. одинаковы при всех условиях его работы.

Выводы:

1. С использованием планирования трехфакторного эксперимента определены оптимальные режимы работы винтового контейнера роторно-винтовых станков при условии выполнения исходных требований к качеству обработки. Согласно полученному уравнению регрессии, при максимальной скорости перемещения частиц масс загрузки, равной 23,49 мм/с, оптимальный коэффициент заполнения винтового контейнера составляет 0,499, а минимальный угол его наклона, при котором будет обеспечиваться устойчивый рабочий процесс, равен $4{,}88^0$.

2. С увеличением угла наклона винтового контейнера скорость перемещения масс загрузки возрастает.

3. Технико-экономические преимущества применения роторно-винтовых технологических систем возникают за счет расширения диапазона изменений резуль-

тирующих векторов перемещений гранул рабочих сред и обрабатываемых деталей, повышения интенсивности их смешивания и переориентации, а также увеличения скорости их перемещения от загрузки к выгрузке. Это позволяет повысить производительность отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2430825 Р Ф, МПК B24B 31/06. Устройство для отделочно-зачистной обработки / Белокур К.А., Серга Г.В.; заявитель и патентообладатель Кубан. гос. аграр. ун-т. – № 2009144621/02; заявл. 01.12.09; опубл. 10.10.11, Бюл. № 28.
2. Пат. 2507053 РФ, МПК B24B 31/02. Устройство для отделочно-зачистной обработки / Серга Г.В., Лебедев В.А., Иванов В.В.; заявитель и патентообладатель Кубан. гос. аграр. ун-т. –№ 2012150229/02; заявл. 23.11.12; опубл. 20.02.14, Бюл. № 5.
3. Пат. 2519398 РФ, МПК B24B 31/02. Станок для химико-отделочно-упрочняющей обработки деталей / Серга Г.В., Иванов В.В., Лебедев В.А.; заявитель и патентообладатель Кубан. гос. аграр. ун-т. - № 2013106597/02; заявл. 14.02.13; опуб. 10.06.14, Бюл. № 16.
4. Лебедев, В.А. Интенсификация отделочно-упрочняющей обработки в винтовых барабанах путем последовательного уплотнения и разрежения массы загрузки / В.А. Лебедев, Н.Н. Кузнецова, Г.В. Серга // Межвуз. сб. науч. ст./ Дон. гос. техн. ун-т. – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2013. – С. 214-231.

1. Pat. 2430825 RF, IPC B24B 31/06. Device for Finishing-Trimming / Belokur K.A., Serga G.V.; Applicant and Patent Holder Kuban State Agricultural University. – № 2009144621/02; Applic. 01.12.09; published. 10.10.11, Bull.Бюл. № 28.
2. Pat. 2507053 RF, IPC B24B 31/02. Device for Finishing-Trimming / Serga G.V., Lebedev V.A., Ivanov V.V.; Applicant and Patent Holder Kuban State Agricultural University –№ 2012150229/02; applic. 23.11.12; published. 20.02.14, Bull. № 5.
3. Pat. 2519398 RF, IPC B24B 31/02. Machine for Chemical Finishing Strengthening of Parts / Serga G.V., Ivanov V.V., Lebedev V.A.; Applicant and Patent Holder Kuban State Agricultural University. - № 2013106597/02; Application 14.02.13; published. 10.06.14, Bull. № 16.
4. Lebedev, B.A. Intensification of Finishing Strengthening in Screw Drums by Successive Compression and Rarefaction of Load Mass / V.A. Lebedev, N.N. Kuznetsova, G.V. Serga // Inter-College Scientific Proceedings/ Don State Technical University. – Rostov-upon-Don: Publishing Center of DSTU, 2013. – pp. 214-231.

Статья поступила в редакцию 11.01.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор кафедры Донского государственного технического университета Тамаркин М.А.

Сведения об авторах:

Серга Георгий Васильевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Начертательная геометрия и графика» Кубанского государственного аграрного университета, г. Краснодар, e-mail: serga-georgy@mail.ru.

Лебедев Валерий Александрович, к.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, тел.: (863)2738-360, e-mail: va.lebidev@yandex.ru.

Белокур Кирилл Алексеевич, к.т.н., доцент кафедры «Строительное производство» Кубанского государственного аграрного университета, г. Краснодар, e-mail: belal.kir@mail.ru.

Яковлев Денис Яковлевич, аспирант Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, тел.: (863)2738-360, e-mail: russchuvak@yandex.ru.

Serga George Vasilievich, D.Eng., Prof., Head of the Dep. “Descriptive Geometry and Graphics” Kuban State Agricultural University, Krasnodar, e-mail: serga-georgy@mail.ru.

Lebedev Valery Alexandrovich, Can.Eng., Prof. of the Dep.“Engineering Techniques” Don State Technical University, Rostov-upon-Don, Phone: (863)2738-360, e-mail: va.lebidev@yandex.ru.

Belokur Kirill Alexeyevich,
Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Construction” Kuban State Agricultural University, Krasnodar, e-mail: belal.kir@mail.ru.

Yakovlev Denis Yakovlevich, Post graduate student Don State Technical University, Rostov-upon-Don, Phone: (863)2738-360, e-mail: russchuvak@yandex.ru.

УДК 681.2-52
DOI: 10.12737/20268

Ю. Н. Можегова

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПОРИСТОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Представлена математическая зависимость пористости от параметров течения газа через материал. Обоснована конструкция устройства неразрушающего контроля пористости материалов. Определена точность контроля пористости материалов газодинамическим методом.

Ключевые слова: автоматизированный неразрушающий контроль, пористость, газодинамический метод, точность, измерительная камера.

Yu.N. Mozhegova

COMPUTERIZED NONDESTRUCTIVE CHECK OF MATERIAL POROSITY

This paper reports the mathematical dependence of material porosity on material structure and conditions of gas flow through material controlled. The design of the device for porosity nondestructive check and a principle of its operation are presented. The results of experimental researches carried out on the products of complex ceramic systems are shown. The accuracy in porosity control on the device offered is substantiated and the recommendations for its use in production are made.

Key words: computerized nondestructive check, porosity, gas-dynamic method, accuracy, mapping camera.

Введение

Автоматизированный неразрушающий контроль в настоящее время широко используется отделами технического контроля на предприятиях машиностроения. В приборостроении при изготовлении устройств контроля предъявляются высокие требования к их точности и качеству проводимого контроля.

Одним из параметров, характеризующих физико-механические свойства пористых материалов (металлокерамических, керамических материалов, сложных керамических систем), является пористость.

Целью работы является разработка на основе теоретически обоснованного способа устройства неразрушающего контроля пористости материалов и обоснование его точности.

Задачи исследования:

1. Разработать устройство неразрушающего контроля пористости материалов.

2. Обосновать точность способа определения пористости материалов.

Теоретические исследования

К неразрушающим методам контроля качества изделий относится газодинамический метод, основанный на исследовании процесса течения газа через контролируемый пористый материал, при котором определяются параметры пористости материалов. Известен способ определения параметров пористости [1], согласно которому на основе уравнений газодинамики была получена математическая зависимость пористости материалов от их структуры и свойств газа:

$$\Pi = \frac{2V_u l t_c}{F^2 P_a} \frac{(P_u - P_c)}{(t - t_c)},$$

где $t_c = \frac{db}{2D}$; V_u – объем газовой полости; l – линейный размер контролируемого ма-

териала в направлении фильтрации; t_c – время, соответствующее переходу от кнудсеновского к ламинарному режиму течения газа; P_u – текущее значение давления газа; P_c – давление, соответствующее переходу от кнудсеновского к ламинарному режиму течения газа; F – площадь материала; P_a – атмосферное давление; t – текущее значение времени, $t > t_c$; d – толщина контролируемого изделия; b – ширина контролируемого изделия; D – коэффициент диффузии газа.

Разработка устройства для неразрушающего контроля пористости материалов

Для реализации способа разработано устройство неразрушающего контроля пористости материалов [2; 3], схема которого приведена на рис. 1.

Устройство снабжено измерительной камерой 1, установленной на одну из плоских поверхностей контролируемого материала. Образованные между измерительной камерой и контролируемым изделием герметичные полости 2 соединены через систему трубопровода 4 с вакуумным насосом 5. Герметизация этих полостей обеспечивается путем прижатия измерительной камеры к изделию с усилием Q и деформации прокладок из вакуумной резины 3. Число измерительных камер может быть увеличено в соответствии с числом поверхностей, в направлении которых планируется осуществлять контроль пористости материала. Для исключения перетечки газа между полостями 2 имеется возможность отключения каждой из них от общей магистрали клапанами 6. Насос 5 отключается от магистрали посредством клапана 7. Каждая из полостей 2 имеет выход на датчики измерения давления газа ДД, информация с которых через систему управления 8 автоматически передается на ЭВМ 9. В ЭВМ 9 встроен датчик времени. В измерительную камеру 1 встроен датчик температуры 10, выход которого подключен к ЭВМ 9.

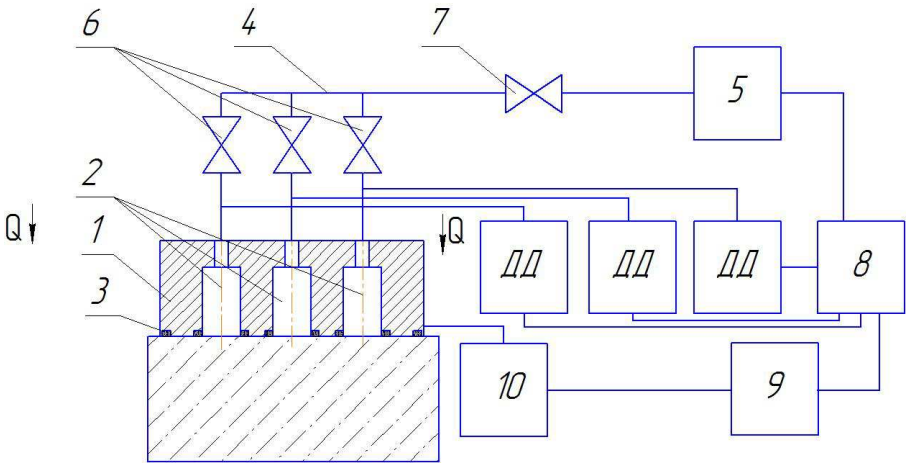


Рис. 1. Устройство неразрушающего контроля пористости материалов

Принцип работы устройства основан на процессе течения газа через исследуемый пористый материал. После установки измерительной камеры 1 на одной из граней контролируемого изделия и обеспечения герметизации полостей 2 осуществляют откачивание газа из этих полостей. Начинается процесс фильтрации газа из окружающей среды через контролируемое изделие в полости 2. На ЭВМ 9 запускается программное обеспечение для построения графических зависимостей изменения давления газа в полостях 2 с течением времени (рис. 2). Передача данных с датчиков давления ДД, установленных в полостях 2, обеспечивается системой управления 8 (рис. 3). Программное обеспечение позволяет осуществлять построение графических зависимостей сразу по нескольким каналам, соответствующим полостям измерительной камеры 1 (до 8 каналов). При этом в зависимости от требований контроля в программе имеется возможность как выборочного подключения по-

лостей 2 одной измерительной камеры 1, так и запуска приема информации с датчиков давления ДД, подключенных к полостям 2 разных измерительных камер 1, установленных, например, на соседние грани контролируемого изделия. Далее программа осуществляет автоматический поиск точки перехода с кнудсеновского режима течения газа на ламинарный и рассчитывает пористость материала.

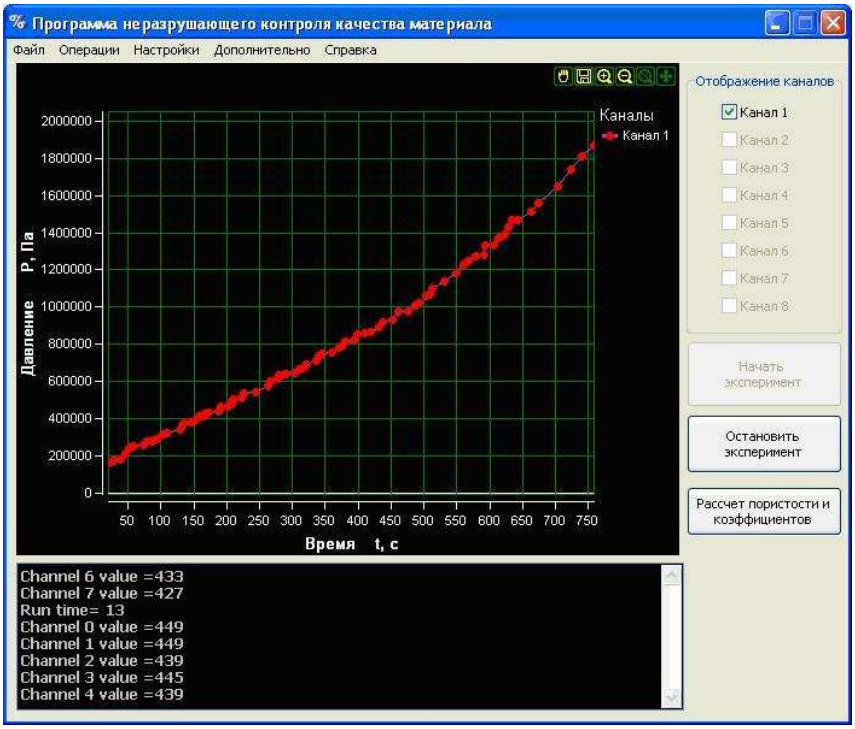


Рис. 2. Программное обеспечение для построения графиков изменения давления газа в зависимости от времени в полостях измерительных камер

Рис. 3. Система управления устройством

Путем последовательного смещения измерительных камер 1 по длине образца обеспечивается детальный контроль участков изделия на требуемое значение пористости, что позволяет выявить явный и скрытый брак. Вид и размеры измеритель-

ных камер 1 выбираются в зависимости от конфигурации детали или тех сечений, на которых необходимо определить пористость.

Для более детального исследования структуры и свойств детали целесообразно устанавливать измерительные камеры 1 на все грани контролируемого изделия. Это позволит проанализировать течение газа не только вдоль контролируемого материала, но и в боковые поры и получить более точную картину параметров пористости изделия и наличия возможных дефектов.

Экспериментальное подтверждение теоретических исследований

Результаты эксперимента по течению воздуха через изделие из сложной керамической системы с водоцементным отношением В/Ц=0,6 и расходом цемента Ц=450 кг на 1 м^3, изготовленное в формах 200×200 мм длиной 25 мм, приведены в табл. 1, а в табл. 2 – погрешности измерений.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Длина изделия l, м	Давление, Па			Время, с		Объем камеры V_u, м^3	Площадь контакта камеры и изделия F, м^2
	P_u	P_c	P_a	t_u	t_c		
0,25	1810,31	1721,02	10132,2	605,34	502,86	$4{,}785\cdot 10^{-6}$	$4{,}785\cdot 10^{-4}$

Таблица 2

Погрешности измерений параметров

Погрешность измерения длины изделия Δl, м	Погрешности измерения давления ΔP_u, ΔP_c, ΔP_a, Па	Погрешности измерения времени Δt, Δt_c, с	Погрешность измерения объема камеры ΔV_u, м^3	Погрешность измерения площади контакта камеры и изделия ΔF, м^2
0,001	0,015	0,01	$7{,}275\cdot 10^{-9}$	$4{,}679\cdot 10^{-7}$

Для обоснования точности способа найдем погрешность измерения пористости материала, зависящую от структуры материала, параметров устройства и их точности при изготовлении, воспользовавшись выражением для определения погрешности косвенных измерений:

$$\delta П=\sqrt{\left(\frac{\partial П}{\partial V_u}\Delta V_u\right)^2+\left(\frac{\partial П}{\partial l}\Delta l\right)^2+\left(\frac{\partial П}{\partial P_u}\Delta P_u\right)^2+\left(\frac{\partial П}{\partial P_c}\Delta P_c\right)^2+\left(\frac{\partial П}{\partial F}\Delta F\right)^2+\left(\frac{\partial П}{\partial P_a}\Delta P_a\right)^2+\left(\frac{\partial П}{\partial t_u}\Delta t_u\right)^2+\left(\frac{\partial П}{\partial t_c}\Delta t_c\right)^2},$$

где δП − величина погрешности измерения пористости.

Коэффициенты влияния и погрешность измерения пористости материала были определены с применением MachCAD 15. Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Таким образом, пористость равна

$$П\pm\Delta П=0{,}054\pm 0{,}002.$$

Очевидно, что наибольшее влияние на точность измерений оказывают точность изготовления устройства контроля и размеры контролируемого изделия. При этом полученные результаты удовлетворяют требованиям производства.

Таблица 3

Результаты расчетов

$\frac{\partial П}{\partial V_и}$	$\frac{\partial П}{\partial P_и}$	$\frac{\partial П}{\partial P_c}$	$\frac{\partial П}{\partial t_c}$	$\Delta П$
$9{,}442\cdot 10^{4}$	$5{,}06\cdot 10^{-4}$	$-5{,}06\cdot 10^{-4}$	$5{,}307\cdot 10^{-4}$	$1{,}909\cdot 10^{-3}$
$\frac{\partial П}{\partial P_a}$	$\frac{\partial П}{\partial F}$	$\frac{\partial П}{\partial l}$	$\frac{\partial П}{\partial t_и}$	
$-4{,}459\cdot 10^{-7}$	-188,842	0,181	$-4{,}409\cdot 10^{-4}$	

Заключение

На основании изложенного можно утверждать, что предлагаемое устройство следует рекомендовать к применению на производстве при проведении контроля пористости материалов изделий, а также контроля свойств материалов конструкций в процессе их эксплуатации. С целью универсального использования данного устройства предлагается изготовление измерительных камер различных форм и размеров, имеющих возможность смены их в устройстве в зависимости от размера контролируемого изделия. Это позволит существенно сократить длительность контроля протяженных поверхностей изделия, исключив процесс перемещения измерительных камер по контролируемой поверхности.

В результате обоснования точности способа определения параметров, характеризующих поровую структуру материала, было выявлено, что точность измерения пористости лежит в пределах 4-6% и зависит от инструментальных источников. Данная точность контроля удовлетворяет требованиям производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ определения параметров пористости материалов: пат. 2305820 РФ: МКИЗ G01N15/08 / Житников Ю. З., Иванов А. Н., Матросова Ю. Н., Матросов А. Е. // Б. И. № 25, 2007.
2. Устройство измерения параметров пористости материалов: пат. 2560751 РФ: МКИ^3 G01N15/08 / Житников Ю. З., Можегова Ю. Н. // Б. И. № 23, 2015.
3. Можегова, Ю.Н. Обоснование точности способа автоматизированного определения минимального размера пор материалов / Ю.Н. Можегова // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. - № 12. – С. 33-37.

1. Method for definition of material porosity parameters: 2305820 Pat. RF: ICI G01N15/08 / Zhitnikov Yu. Z., Ivanov A. N., Matrosova Yu. N., Matrosov A. E. // B. I. № 25, 2007.
2. Device Material Porosity Parameters Measuring: 2560751 Pat. RF: ICI^3 G01N15/08 / Zhitnikov Yu. Z., Mozhegova Yu. N. // B. I. № 23, 2015.
3. Mozhegova, Yu.N. Accuracy substantiation of computerized method for definition of pore minimum size in materials / Yu.N. Mozhegova // Assemblage in Mechanical Engineering, Instrument-Making. – 2015. - № 12. – pp. 33-37.

Статья поступила в редколлегию 9.02.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор КГТА им. Дегтярева Житников Ю.З.

Сведения об авторах:

Можегова Юлия Николаевна, к.т.н., доцент, директор энергомеханического колледжа Ковровской государственной технологической академии им. В. А. Дегтярева, e-mail: kandy2701@mail.ru.

Mozhegova Julia Nikolayevna, Can.Eng., Assistant Prof., Director of Power-mechanical College of Degtyaryov State Technological Academy of Kovrov, e-mail: kandy2701@mail.ru.

УДК 621.74.042
DOI: 10.12737/20269

Н. А. Жижкина

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЛИТЫХ ВАЛКОВ

Рассмотрено центробежное литье листопрокатных валков. Изучено влияние скорости вращения литейной формы на структуру и уровень свойств рабочего слоя валков. Проанализирована микроструктура (размер первичных зерен, их состав) исследуемых изделий.

Ключевые слова: центробежнолитые валки, рабочий слой, структурообразование, центробежная машина.

N.A. Zhizhkina

TECHNOLOGY OPTIMIZATION FOR CENTRIFUGAL-CAST ROLL MANUFACTURING

This paper reports the sheet roll spun casting. It is shown that sheet rolls of required quality and with minimum production costs are manufactured through a method of spun casting on a machine with a vertical axis of a mould rotation. It is defined that at spun casting a more intensive foundry cooling occurs as a result of which a blank is characterized with a denser and more even structure of a working layer. It is revealed that the stability of such a process depends to a considerable degree upon a spin casting system functioning a significant property of which is a speed of rotation.

In the paper there is analyzed a rotation speed influence upon a grain size, a quantitative ratio of structural constituents in a working layer composed of nickel-chromium cast iron and also upon the level of its properties. The analysis of the rotation speed influence of a casting mold upon a structure and a property level of a roll working surface was based on experimental investigations of foundries under industrial conditions. The microstructure (the size of primary grains, their composition) of products analyzed was estimated with the aid of a common metallographic procedure.

On the basis of experiments carried out it is determined that even an insignificant increase (by 7%) of mould rotation speed during roll casting allows without expensive processing of liquid melt of a working layer increasing its structure uniformity. As a result of this the level of its properties increases (hardness – by 3 units). Consequently, the increase of rolling tool efficiency is expected.

The presented results of investigations are basic for works on servicing characteristics increase of spin-cast rolls.

Key words: spin-cast rolls, working layer, structure formation, spin casting system.

Повышение эксплуатационной стойкости и долговечности прокатных валков различного назначения, в том числе для листовых станов, в связи с интенсификацией производства остается актуальной задачей. Ее решение возможно путем совершенствования технологии изготовления литых заготовок и оптимизации их химического состава.

Ввиду того что основными требованиями к качеству формующего инструмента являются износостойкаярабочаяповерхность и прочная сердцевина, валки изготовляют из разнородных материалов. Но из-за различия в уровне их теплофизических свойств в процессе эксплуатации возможно разрушение или отслоение формующего инструмента. Получитьиз разнородных материаловизделие требуемого качества с минимальными производственными затратами позволяет метод центробежного литья. Такая технология имеет ряд преимуществ по сравнению со стационарным литьем:

- возможность использования для рабочего слоя износостойких, но малотехнологичных в литье сложнолегированных сплавов (быстрорежущая сталь, высоколегированный чугун), а для сердцевины – материалов с высокими показателями обрабатываемости и усталостной прочности (углеродистая сталь, серый и высокопрочный чугуны);

- более равномерное распределение структурных составляющих и свойств износостойкого сплава по глубине и длине рабочего слоя.

С другой стороны, центробежное литье в отличие от методов бандажирования и электрошлакового переплава (ЭШП) обеспечивает формирование переходной зоны, обусловливающей плавный переход от твердого рабочего слоя к вязкой сердцевине, что способствует повышению надежности прокатного инструмента при эксплуатации.

Анализ патентной и технической литературы [3-9], касающейся разработок специального центробежного оборудования для изготовления листопрокатных валков (общей массой заготовки до 20 тонн), выдвигает на первое местомашину с вращением литейной формы вокруг вертикальной оси. Конструкция такой машины снабжена литниковой системой для заполнения внутренней полости формы и дозатором для регулирования массы заливаемого металла.

В ходе промышленного освоения новой технологии изготовления валков установлено, что при центробежном литье имеет место значительное изменение температуры по длине отливки. При продвижении расплава от нижней части формы, где находится наиболее горячий металл, к верхней зоне в процессе формирования рабочего слоя валка происходят существенные потери тепла. В результате к моменту заливки первой порции металла сердцевины возникает дестабилизация условий сваривания слоев в различных по высоте зонах отливки, что затрудняет выбор времени ее начала.

Для обеспечения надежного сваривания у верхнего торца заливаемой формы и предотвращения смешивания металлов рабочего слоя и сердцевины в нижней ее части центробежная машина снабжена подвижной литниковой системой [4]. Разработке такой системы предшествовали теоретические расчеты и специальные эксперименты по оптимизации режима заполнения вращающейся формы, заключающейся в определении скорости перемещения литника в соответствии с подъемом жидкого металла рабочего слоя вдоль кокиля под действием центробежных сил.

В результате проведенных исследований разработана новая технология, позволяющая изготовлять высококачественные валки для ведущих мировых производителей листового проката (ОАО «Северсталь», НЛМК), а в перспективе и изделия с профилированной рабочей поверхностью (для сортовой прокатки).

Вместе с тем изготовление валков методом центробежного литья с вертикальной осью вращения представляет собой достаточно сложный технологический процесс, зависящий от множества производственных факторов, в том числе от работы оборудования. Установлено, что стабильность работы центробежной машины при формировании рабочего слоя определяет равномерность распределения его металла в полости вращающейся изложницы, что оказывает значительное влияние на целостность валковой отливки [6]. При этом выявлено, что силы вращения способствуют измельчению структуры кристаллизующегося рабочего слоя, а следовательно, повышению износостойкости формующего инструмента [5; 7].

Цель работы – исследовать влияние скорости вращения на размер зерна, количественное соотношение структурных составляющих в рабочем слое из хромоникелевого чугуна.

Изучение процесса формирования рабочего слоя валка в поле действия центробежных сил показало, что на начальном этапе заливки его расплав вовлекается во вращательное движение и прижимается к стенкам кокиля. В результате устанавливается тепловой обмен между ним и стенкой кокиля, что способствует мгновенному образованию тонкой корки затвердевшего металла. При продвижении фронта кристаллизации происходит усадка корки затвердевшего металла и образование газового зазора между отливкой и кокилем, что вызывает резкое падение интенсивности охлаждения заготовки. В результате вдоль фронта кристаллизации формируется граница, разделяющая структуру отливки на две зоны: наружную мелкозернистую и внутреннюю столбчатую (рис. 1).

Микроструктура наружной зоны, мгновенно сформировавшейся при соприкосновении вращающегося расплава со стенкой кокиля, состоит из дезориентированных мелких дендритов и карбидной эвтектики (рис. 1 а). Микроструктура внутренней зоны, образовавшейся после формирования газового зазора между отливкой и стенкой изложницы, представлена четко ориентированными в направлении теплового потока столбчатыми кристаллами – дендритами, в промежутках между которыми наблюдается карбидная эвтектика (рис.1 б).

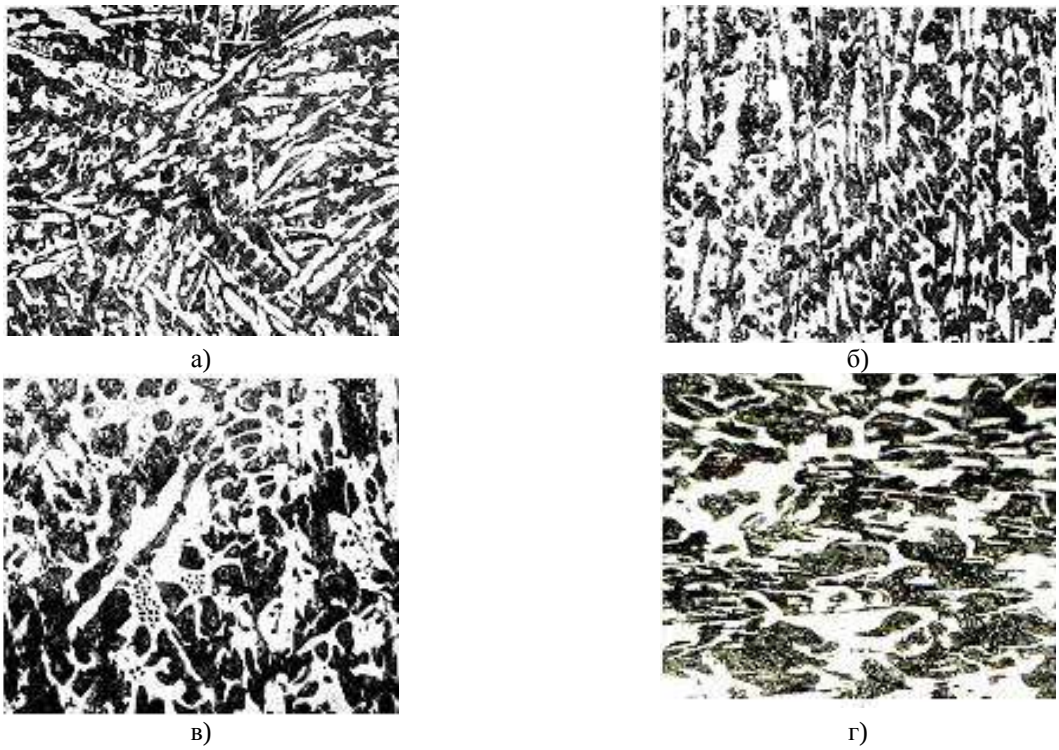


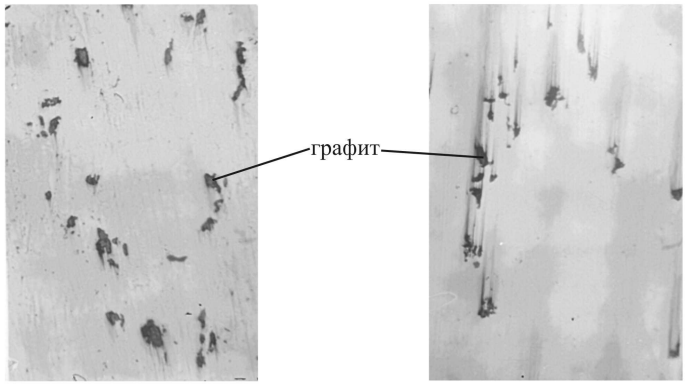
Рис. 1. Изменение микроструктуры по сечению валка (травлено, × 100):
а – у литой поверхности бочки; б, в, г – на глубине 10, 25 и 40 мм

После окончания заливки металла рабочего слоя часть его тепла продолжает отводиться в стенки формы путем теплопередачи, а другая часть – конвекцией и излучением со стороны свободной поверхности вращающегося металла. Выделяющиеся на свободной поверхности кристаллы, имеющие плотность большую, чем плотность расплава, под действием центробежных сил перемещаются к стенкам формы, а жидкая фаза металла – к свободной поверхности. Вследствие этого возникает циркуляция расплава, и затвердевание отливки происходит в радиальном направлении. При этом растущие в радиальном направлении дендриты постоянно соприкасаются с жидким металлом, что способствует формированию более разветвленной микроструктуры (рис. 1 в). Свободная внутренняя поверхность рабочего слоя затвердевает в последнюю очередь в условиях замедленной интенсивности охлаждения расплава и действия давления, развиваемого при вращении металла. В результате кристаллизуется грубозернистая структура, ориентированная в направлении вращения металла (рис.1 г). Следовательно, вращение формы способствует формированию более плотной и равномерной структуры рабочего слоя. Вместе с тем значительный практический интерес представляет изучение влияния повышения скорости вращения на процесс его структурообразования.

В связи с этим в промышленных условиях были проведены экспериментальные исследования влияния скорости вращения формы на структуру рабочего слоя массивных валков. Исследования проводили на 20 валковых отливках одного ти-

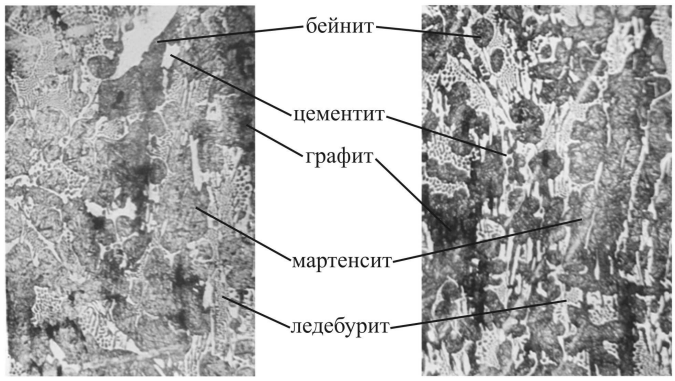
поразмера ($D_{бочки}$ = 0,85 м, $I_{бочки}$ = 2,5 м) с рабочим слоем из хромоникелевого чугуна, содержащего 3,20-3,24 % C, 0,54-0,60 % Si, 0,59-0,64 % Mn, не более 0,10 % P, до 0,05% S,1,53-1,56% Cr, 4,26-4,57 % Ni. В ходе эксперимента изменяли скорость вращения формы в интервале 44,05-47,19 $с^{-1}$. Такой диапазон значений выбран из условия подъема хромоникелевого чугуна в полном объеме из полости нижней шейки и формирования из него рабочего слоя в движущейся изложнице.

Анализ структуры проводили согласно методике [2] на образцах, отобранных от рабочего слоя исследуемых отливок, с помощью микроскопа МИМ-10 при увеличении × 100. Сравнивали размеры первичных дендритов по длине их стволов (h) и расстоянию между краями ветвей второго порядка (l), а также оценивали состав структурных составляющих и их количество в исследуемых образцах (рис. 2, 3). Для этого выполнили согласно [1] расчет средних значений и дисперсий измеренных величин (табл. 1, 2).



а) б)

Рис. 2. Распределение включений графита в рабочем слое валков, отлитых при скорости вращения (не травлено, ×100): а - ω = 44,05 $с^{-1}$; б - ω = 47,19 $с^{-1}$



а) б)

Рис. 3. Микроструктура материала рабочего слоя валков, отлитых при скорости вращения (травлено, ×100): а - ω = 44,05 $с^{-1}$; б - ω = 47,19 $с^{-1}$

Таблица 1

Сравнение первичной структуры исследуемых образцов

№ п/п	Скорость вращения ω, $с^{-1}$	Количество полей зрения, шт.	Средние значения показаний по выборке, $x10^{-3}$ м		Дисперсия показаний по выборке s^2	
			Длина ствола h	Расстояние между краями ветвей 2-го порядка l	Длина ствола h	Расстояние между краями ветвей 2-го порядка l
1	44,05	43	0,45	0,18	0,0015	0,0009
2	47,19	45	0,23	0,22	0,0009	0,0006

Из табл.1 следует, что повышение скорости вращения на 3,14 $с^{-1}$способствует формированию более разветвленных дендритов. При этом структура характеризуется большей однородностью: уменьшилась дисперсия показаний при измерениикакдлины ствола, так и расстояния между краями ветвей 2-го порядка.

Таблица 2

Состав структуры и содержание ее составляющих

№ п/п	Количество полей зрения, шт.	Среднее значение площадивключений графита s, $\times 10^{-6}$ $м^2$	Содержание структурных составляющих, %					Твердость HSД
			Графит	Цементит	Мартенсит	Бейнит	Ледебурит	
1	43	0,0014	3,5	12,4	32,3	33,4	18,4	75
2	45	0,0007	1,8	6,3	31,8	31,6	28,5	78

Сравнение количества, формы и распределения графитовых включений в исследуемых образцах показало следующее:

- в образцах сравниваемых группграфит (согласно ГОСТ 3443-87) представлен вермикулярной утолщенной (ВГф3) и шаровидной неправильной (ШГф2) формами включений (рис. 2);
- увеличение скорости вращения на 7 % способствует уменьшению размеров включений: среднее значение площади графитовых включений снижается в 2 раза;
- во всех случаях наблюдается неравномерное распределение графита.

В результате исследований получено, что образцы, отлитые при ω = 44,05 $с^{-1}$, характеризуются большей долей цементита, чем темплеты, изготовленные при ω = 47,19 $с^{-1}$. Фазовый состав металлической матрицы сравниваемых валков отличается незначительно.

Итак, листопрокатные валки требуемого качества и с минимальными производственными затратами получают центробежным литьем на машине с вертикальной осью вращения изложницы. Установлено, что при центробежном литье происходит более интенсивное охлаждение отливки, в результате чего заготовка характеризуется более плотной и равномерной структурой рабочего слоя. Выявлено, что стабильность такого процесса в значительной степени зависит от работы центробежной машины, важной характеристикой которой является скорость вращения.

На основании проведенных экспериментов определено, что даже незначительное (на 7 %) увеличение скорости вращения формы в процессе литья позволяетбез дорогостоящей обработки расплава рабочего слоя увеличить однородность его структуры. В результате повышается уровеньего свойств (твердости – на 3 единицы). Поэтому исследования, направленные на повышение эксплуатационных характеристик центробежнолитых валков путем совершенствования технологии их изготовления, продолжаются.

Работа выполнена в рамках внутреннего гранта БГТУ №117«Теоретические и технологические основы повышения работоспособности прокатных валков».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
2. Богомолова, Н. А. Практическая металлография / Н. А. Богомолова. — М.: Высш. шк., 1978. — 272 с.
3. Будагьянц, Н. А. Литье прокатных валков / Н. А. Будагьянц, Н.А. Жижкина // Литейное производство. – 1998. - № 7. – С.39-40.
4. Жижкина, Н. А. Производство центробежнолитых валков с высоколегированным рабочим слоем: монография / Н. А. Жижкина. – Луганск: Ноулидж, 2011. – 167 с.
5. Жижкина, Н. А.Структурообразование высоколегированного чугуна в поле действия центро-

бежных сил / Н. А. Жижкина // Металл и литье Украины. – 2012. – № 12 (235). – С. 11-13.
6. Жижкина, Н. А. Исследование устойчивости работы центробежной машины при литье массивных валков/ Н. А. Жижкина // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2012.- № 13 (184). –Ч. 1. –С. 89-94.
7. Жижкина, Н. А. Анализ особенностей строения чугунов различного состава / Н. А. Жижкина, С. А. Ипатов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. - № 1 (45). – С. 20-25.
8. Пат. 2173607 РФ, МПК 7 B22D13/04. Центробежная литейная машина / Н. А. Будагьянц, Л. Б. Гольдштейн, И. А. Балаклеец, В. И. Кондратенко (Украина). - № 20000102401/02; заявл. 31.01.00; опубл. 20.09.01, Бюл. № 9. – 4 с.
9. Серебряков, С.П. Особенности центробежного литья с вертикальной осью вращения / С.П. Серебряков, Я.В. Фролов, Б.В. Фокин // Литейное производство. – 2007. - № 1. – С. 18-20.

1. Adler, Yu.P. Experiment Planning at Optimum Condition Search / Yu.P. Adler, E. V. Markova, Yu.V. Granovsky. – M.: Science, 1976. – pp. 279.
2. Bogomolova, N. A. Practical Metallography / N. A. Bogomolova. ─ M.: Higher School, 1978. ─ pp. 272.
3. Budagiyants, N. A. Sheet Roll Casting / N. A. Budagiyants, N.A. Zhizhkina // Foundry. – 1998. - № 7. – pp. 39-40.
4. Zhizhkina, N. A. Production of Spin-Cast Rolls with High-Alloy Working Layer: Monograph / N. A. Zhizhkina. – Lugansk: Knowledge, 2011. – pp. 167.
5. Zhizhkina , N. A. Structure formation in high-alloy cast iron under centrifugal force effect / N. A. Zhizhkina // Metal and Castings of Ukraine. – 2012. – № 12 (235). – pp. 11-13.
6. Zhizhkina, N. A. Operation stability investigation in spin casting system at massive roll casting/ N. A. Zhizhkina // Bulletin of Dal National University of Ukraine. – 2012.- № 13 (184). –Part. 1. – pp. 89-94.
7. Zhizhkina, N. A. Analysis of structural peculiarities in different cast iron compositions / N. A. Zhizhkina, S. A. Ipatov // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2015. - № 1 (45). – pp. 20-25.
8. Pat. 2173607 RF, IPC 7 B22D13/04. Spin Casting System / N. A. Budagiyants, L.B. Goldstein, I. A. Balakleyets, V.I. Kondratenko (Ukraine). - № 20000102401/02; applied 31.01.00; published 20.09.01, Bull. № 9. – pp. 4.
9. Serebryakov, S.P. Peculiarities of spun casting with vertical rotation axis / S.P. Serebryakov, Ya.V. Frolov, B.V. Fokin // Foundry. – 2007. - № 1. – pp. 18-20.

Статья поступила в редколлегию 18.02.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Давыдов С.В.

Сведения об авторах:

Жижкина Наталья Александровна, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, e-mail: litjo_snu@mail.ru.

Zhizhkina Natalia Alexandrovna, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering & Material Science” Bryansk State Technical University, e-mail: litjo_snu@mail.ru.

УДК 62-529; 681.5
DOI: 10.12737/20271

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В.И. Аверченков, А.С. Самсоненко

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ИНСПЕКЦИЕЙ ПРИ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ПАЙКИ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ

Проведен анализ строения и функционирования современных оптических инспекций. Рассмотрены пути усовершенствования функциональной схемы оптической инспекции, описаны её основные узлы и их взаимодействие. Представлены системы координат для управления оборудованием и способы их расчета. Предложен новый вид разработанного алгоритма управления оптической инспекцией.

Ключевые слова: автоматическая оптическая инспекция, АОИ, технология поверхностного монтажа, печатные узлы, контроль качества пайки, станкостроение.

V.I. Averchenkov, A.S. Samsonenko

AUTOMATION OF OPTIC INSPECTION CONTROL AT QUALITY MANAGEMENT OF PRINTED CIRCUIT ASSEMBLY SOLDERING

The development of methods of designing and assembling electronic units on circuit boards with the use of surface assembling techniques (SAT) became one of the priority fields. The product optic control is the most common method of control carried out by specialized equipment, an automated optic inspection (AOI). On the basis of the fulfilled analysis of technical solutions on the organization of inspections of different manufacturers and according to the test results in practice of some variants there was offered a circuit including the following equipment layout: a set of chambers, a system of linear displacement, a controller, a computer and software.

The optical inspection software can be divided into the software of management and the software of control. The former serves for the computation of a control signal, the comparison of co-ordinates of equipment (with physical (F), imported (C) and inspected (P)) interpretation of coordinates, interpolation and so on. The software of control contains modules: of data import from Gerber-file, the identification of board images obtained from the chamber, of the computation and comparison of identified components with a standard, of the analysis defects and the definition of a defect type, of database (DB) filling, of the interaction with a user.

The system described in comparison with foreign analogues has a smaller set of options, but solves a problem of control under conditions of enterprises manufacturing electronics of the second class (according to IPCA-610 Standard “Criteria for Electronic Assemblage Acceptance).

Key words: automated optical inspection, AOI, surface mounting, printed circuit assemblies, soldering quality management, machine-tool construction.

Развитие технологии производства электронных сборок является одной из важнейших проблем современной электронной промышленности. В настоящее время наблюдается стремительный рост числа производителей элементной базы и оборудования в этой сфере деятельности. При этом одним из приоритетных направлений стало развитие методов конструирования и сборки электронных узлов на печатной плате с использованием технологии поверхностного монтажа (SMT). С учетом актуальности этого направления развития электронной промышленности особая роль отводится поиску новых подходов к импортозамещению современного наукоемкого оборудования в технологии производства печатных узлов [1;2].

В электронной промышленности, как и в любом производстве, особое внимание уделяют контролю. Наиболее распространенным способом является оптический контроль, осуществляемый специализированным оборудованием, основанным на применении автоматической оптической инспекции (АОИ) с высокоточными каме-

рами и специальным ПО для распознавания дефектов электронных компонентов [2].

Однако острая нехватка оборудования для автоматического контроля электронных сборок в настоящее время приводит к сдерживанию развития электронной промышленности.

Анализ существующих зарубежных систем оптического контроля показал, что в этих типовых технологических комплексах используются следующие основные части оборудования:

1. Камеры. В базовой комплектации применяются 2 блока, включающие 4 ортогональные камеры с суммарным разрешением 57,6 × 43,5 мм (2592 × 1944 пикселя на камеру) и 4 угловые цветные камеры. Разрешение камер прямоугольного блока позволяет распознавать крупные компоненты (QFP208 30x30 мм, разъемы и т.д.). Угловые камеры в блоке располагаются по окружности с шагом 45°. Разрешающая способность ортогональных камер составляет 23,4 мкм на пиксель, камер углового блока – 16,1 мкм на пиксель. Блоки камер используются совместно с четырехцветной подсветкой [1].

2. Компьютер станции верификации. Компьютер соединен с АОИ локальной сетью, что позволяет удаленно проводить анализ дефектов печатных плат с последующей корректировкой инспектирующей программы при необходимости.

3. Устройство манипуляции. Для манипулирования печатной платой используется ременный конвейер с антистатическим покрытием. В системе манипулирования блоком камер применяются линейные приводы. Конвейер установлен на встраиваемых в линию АОИ, которые при необходимости могут работать и в автономном режиме.

Для работы такого технологического комплекса используется специализированное программное обеспечение (ПО).

В последние годы основной упор при разработке оборудования для АОИ делается на простоту управления, интуитивное меню, возможность быстрого создания инспектирующих программ и графический интерфейс [2]. Для этих целей наиболее эффективно использовать рабочие программы, которые создаются на основе формата Gerber – файла, представляющего собой способ описания проекта печатной платы для её изготовления [17]. Импорт файла позволяет воспроизвести 3D-модель узла печатной платы. Далее по этой модели происходит визуальная оценка качества инспектирующей программы и, при необходимости, ее корректировка. ПО позволяет работать и с двухмерным изображением при отладке программы. При отладке также используется меню, позволяющее задать границу между ложными срабатываниями и существующими дефектами. По окончании отладки контроль осуществляется с помощью программы, посредством которой происходит анализ дефектов, поступивших по локальной сети. Далее на монитор для сравнения выводятся полученные изображения, снимки компонента-эталона и примеры дефектов из библиотеки. ПО позволяет оценить снимки с угловых камер для более точного определения дефекта. Программа дает возможность пополнять библиотеку дефектов в соответствии с требованиями производства [2].

Анализ работы существующих систем АОИ позволил выявить следующие особенности использования оборудования:

- При импорте из Gerber-файла можно узнать лишь координаты расположения компонентов и их маркировку. В библиотеке хранятся трехмерные модели компонентов, для пользователя строится наглядное представление профиля платы.
- Алгоритмы проведения инспекции, подбора света, методы обхода платы и т.д. не приводятся в открытом доступе и требуют индивидуальной разработки под конкретные задачи. При необходимости можно лишь поправить доверительные границы, ввиду специфики производства.
- В системе применяется 4-цветная подсветка (красный, синий, зеленый, белый). Для работы алгоритма используются первые три цвета, для наглядного представления дефекта оператору предоставляется возможность использовать белый цвет. Исходя из этого, невозможно понять, как именно работает алгоритм распознавания и анализа, но можно предположить,

что применяется четырехцветный алгоритм распознавания (Quad-Color Technology), описанный компанией MVP (Machine Vision Products) [3].

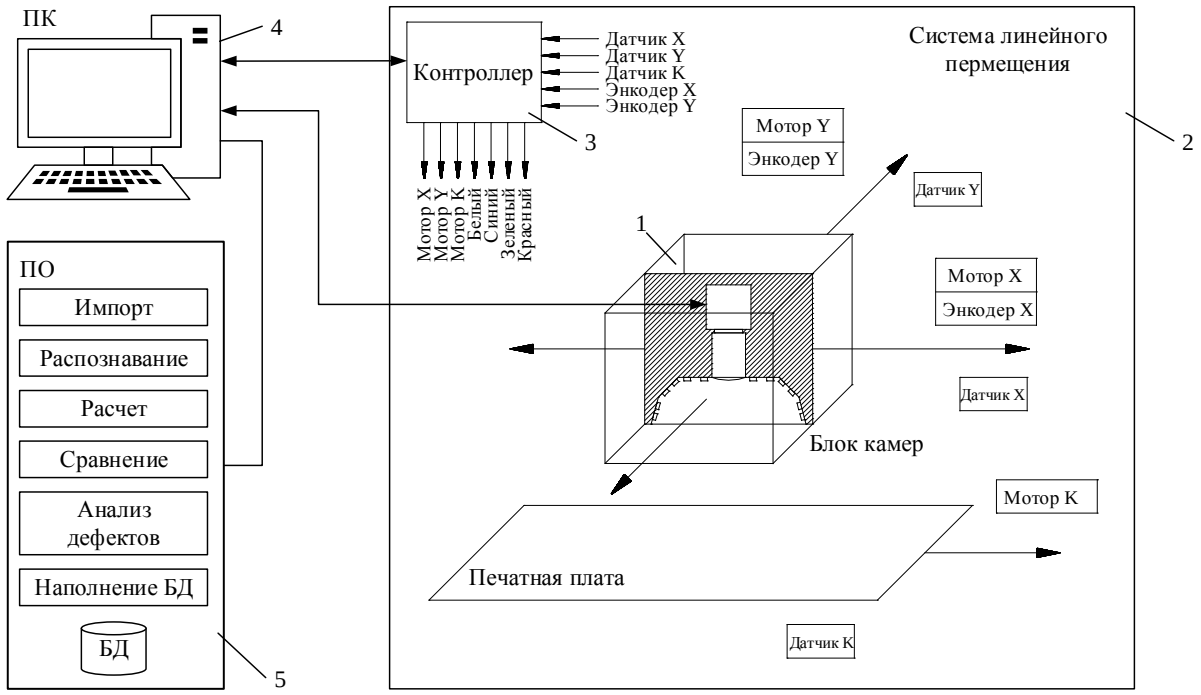


Рис. 1. Функциональная схема АОИ

На основе проведенного анализа технических решений по организации инспекций различных производителей [4-11] и по результатам испытаний на практике нескольких вариантов была предложена схема (рис. 1), включающая следующую компоновку оборудования:

1. *Блок камер*. Одной из главных составляющих является пятимегапиксельная камера с разрешением 2592 x 1944 пикселя. Базовая точность камеры составляет 2,2 мкм/пиксель. После настройки с помощью объектива точность составит 14 мкм/пиксель. Другим ключевым узлом является светодиодная подсветка, состоящая из модульных плат со светодиодами, у которых угол распространения света не менее 120 градусов. В подсветке используются белый, красный и синий цвета: белый – для анализа геометрических характеристик компонента, красный – для анализа галтели припоя, синий – для чтения маркировки компонента [3]. Вся конструкция закрыта кожухом для предотвращения попадания света извне. Кожух и все детали красятся в черный матовый цвет, так как необходимо полное отсутствие любых отражающих поверхностей.

2. *Система линейного перемещения*. В электрическую часть входят моторы и датчики. Два мотора перемещают блок камер по осям X и Y, а третий перемещает плату вдоль по конвейеру. Один высокоточный датчик-энкодер (устройство, преобразующее линейные перемещения в последовательность импульсов определенного формата [18]) считывает координаты блока камер по оси X, второй – по оси Y. Имеются два датчика для обнуления показаний датчиков-энкодеров (по осям X и Y соответственно), а также датчик наличия платы в зоне контроля. Механика может быть различной (линейные направляющие, валы и т.д.).

3. *Контроллер*. Для управления электрической составляющей линейного перемещения блока камер используется контроллер. Он управляет моторами, считывает координаты нахождения блока камер по осям X, Y с датчиков-энкодеров, а также показания с датчиков обнуления координат и датчика наличия платы. При помощи него происходит управление подсветкой. Также контроллер преобразует аналоговый сигнал в цифровой и осуществляет обмен данными с персональным компьютером.

4. *Компьютер* с установленным программным обеспечением и подключенными устройствами ввода-вывода и интерфейсом взаимодействия с контроллером.

5. *Программное обеспечение*, включающее ряд модулей:

1) модуль импорта данных из Gerber-файла, сгенерированного в САПР для разработки электронных сборок;

2) модуль распознавания полученных из камеры изображений платы;

3) модуль расчета и сравнения распознанных компонентов с эталоном;

4) модуль анализа дефектов, определения типа дефекта;

5) модуль наполнения базы данных (БД);

6) модуль взаимодействия с пользователем.

Предлагаемая компоновка оборудования, полученная эвристически на основе анализа зарубежного оборудования, является упрощенной моделью для осуществления контроля электронных сборок. Наиболее наукоемким вопросом импортозамещения рассматриваемой технологии является разработка программного обеспечения.

Программное обеспечение оптической инспекции можно разделить на ПО управления и ПО контроля. При управлении для общения с устройствами используется контроллер, передающий управляющий сигнал. ПО управления служит для расчета управляющего сигнала, сопоставления систем координат оборудования, интерпретации координат, интерполяции и т.д.

В оборудовании существует одновременно несколько систем координат:

1. Физическая система координат (F), определяющая реальные размеры узлов и их ориентацию в пространстве, которая может быть описана зависимостью

$$F = \begin{pmatrix} f_{i,j} & \cdots & f_{i,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m,j} & \cdots & f_{m,n} \end{pmatrix}, \qquad f_{i,j} = (X_i, Y_j), \qquad i = 1 \ldots m, \qquad j = 1 \ldots n,$$

где f – ячейка матрицы, хранящая физические координаты камеры; X – координата точки по оси X, мм; Y – координата точки по оси Y, мм; i, j – порядковый номер элемента. Размерность матрицы зависит от длины максимально возможного перемещения камеры (с точностью высокоточного датчика-энкодера).

2. Система координат оборудования (R), определяемая при помощи датчиков-энкодеров, используемая для перемещения блока камер и сопоставляемая с физической системой координат путем калибровки для точного позиционирования блока камер в пространстве.

$$R = \begin{pmatrix} r_{i,j} & \cdots & r_{i,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m,j} & \cdots & r_{m,n} \end{pmatrix}, \qquad r_{i,j} = (X_i, Y_q), \qquad i = 1 \ldots m, \qquad j = 1 \ldots n,$$

где позиции *i*, *j* соответствуют матрице F, но координаты точки $X_i, Y_q \neq X_i, Y_j$ и заполняются путем калибровки. Система координат заполняется и считывается согласно показаниям датчика-энкодера.

3. Система координат импортируемого Gerber-файла (C), содержащая в себе координаты реперных точек (калибровочных точек платы) и теоретические, программно заложенные координаты установленных компонентов.

$$C = \begin{pmatrix} c_{i,j} & \cdots & c_{i,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m,j} & \cdots & c_{m,n} \end{pmatrix}, \qquad C = R + K, \qquad K = (K_x, K_y),$$

где K – коэффициент смещения по осям X и Y соответственно.

4. Система координат инспектируемой печатной платы (P), определяемая путем распознавания и анализа реперных точек платы, – основная система координат для расчета позиционирования компонентов на плате, используемая для синхронизации системы координат импортируемого Gerber-файла с системой координат оборудования.

$$P = \begin{pmatrix} p_{i,j} & \cdots & p_{i,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m,j} & \cdots & p_{m,n} \end{pmatrix}, \qquad p_{i,j} = (p_i, p_j),$$

$$p_i = K_x + X_l \cos\varphi - Y_q \sin\varphi, \qquad p_j = K_y + X_l \sin\varphi + Y_q \cos\varphi,$$

где $p_{i,j}$ – координаты точек печатного узла, используемые для определения дефектов при расчете смещения или поворота компонента [16].

Программное обеспечение контроля (рис.3) использует для расчетов систему координат P, но перед началом работы необходимо провести калибровку системы. При включении системы происходит инициализация всех приводов и датчиков. Моторы перемещения осуществляют движение блока камер по осям X и Y в начальную точку, пока не сработают датчики обнуления координат по осям X и Y соответственно. Далее начинают работу высокоточные датчики-энкодеры. Параллельно третий мотор вращает конвейер для проверки отсутствия плат на конвейере при помощи датчика наличия платы.

Перед началом калибровки необходимо загрузить Gerber-файл, содержащий информацию о плате: ее габариты, координаты и размер реперных точек, координаты компонентов, их названия, геометрические характеристики, контактные площадки и т.д. Из Gerber-файла посредством модуля импорта данные переносятся в таблицу базы данных.

При начале калибровки проверяется наличие печатной платы на конвейере путем опроса датчика наличия платы. Если плата отсутствует, включается мотор конвейера, пока не сработает датчик или не пройдет 2 минуты. В случае отсутствия печатной платы предлагается проверить её наличие в оборудовании.

В случае успеха камера перемещается по координатам Gerber-файла к центру реперной точки №1, происходит захват изображения (включение белой подсветки, фотографирование камерой изображения). Далее изображение передается на распознавание контура окружности (или квадрата), после чего происходит расчет координат центра реперного знака по полученному контуру (рис. 4). Затем камера едет по координатам Gerber-файла к центру реперной точки №2, выполняя те же действия и получая координаты центра реперного знака. Далее идет сопоставление координат распознанных точек и координат, взятых из Gerber-файла, расчет коэффициентов поворота и масштабирования для синхронизации систем координат.

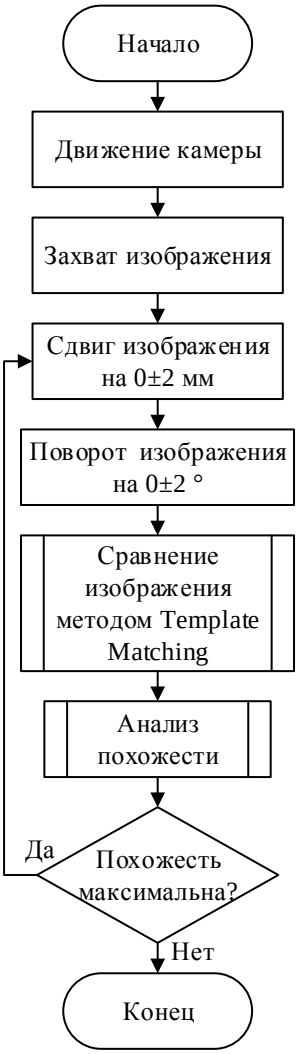


Рис. 2. Расчет смещения компонента

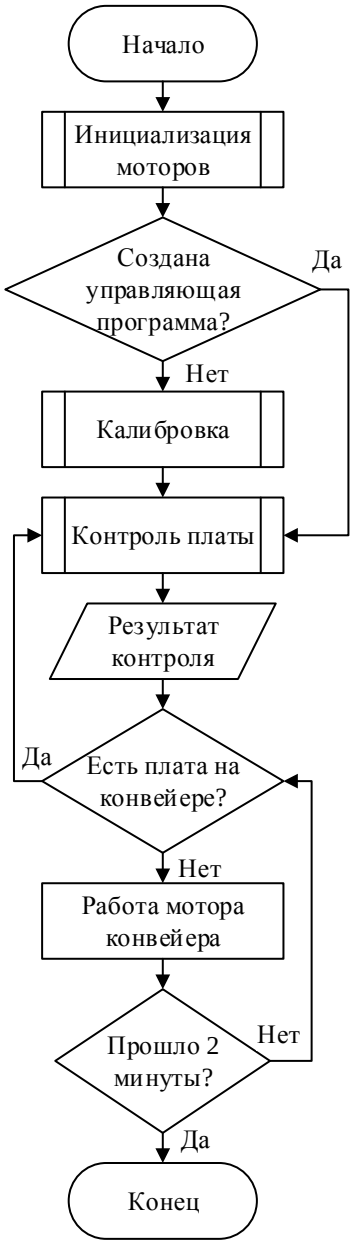


Рис. 3. Алгоритм работы ПО

После синхронизации систем координат происходит создание шаблона для проверки компонентов. Камера едет по координатам Gerber-файла к центру первого компонента, захватывает изображение и определяет центр (рис. 5). Создается шаблон для проверки компонента. Берется изображение, размер которого превышает геометрические характеристики компонента на величину суммарной погрешности позиционирования (обычно не более 2мм, что не критично для объема памяти, занимаемого шаблоном в БД) (рис. 2). Изображение помещают в виде шаблона в базу данных. Затем переходят к следующему компоненту и так далее до последнего.

Рис. 4. Расчет реперной точки

После прохождения процедуры калибровки печатного узла можно начинать инспектировать платы. Для этого плата загружается на конвейер. После ответа датчика наличия платы начинается обход платы. При этом из захваченных изображений берется изображение компонента по координатам, сравнивается похожесть изображений методом Template Matching [12]. При низкой похожести изображений можно говорить о наличии дефекта (отсутствие, «надгробный камень» и т.д.). При высокой степени похожести выполняется расчет центра компонента и определяется величина смещения вдоль оси или поворота. Далее эта величина сравнивается с табцей дефектов для данного компонента и принимается решение о наличии или отсутствии дефекта.

Рис. 5. Расчет центра компонента

Сопоставив предлагаемую систему с существующими техническими решениями [13-15], можно сделать вывод, что предлагаемая система решает задачи проверки печатных узлов с той же скоростью, требуя меньших вычислительных ресурсов и используя всего одну камеру. Программное обеспечение основано на открытом программном коде, что также снижает стоимость и позволяет улучшать систему за счет постоянно текущего процесса улучшения библиотек OpenCV. Продукт не является коммерческим, и появляется возможность использовать его на малых предприятиях и в лабораториях, не приобретая при этом дорогостоящие аналоги.

Описанная система позволяет руживать дефекты для плат второго класса (согласно стандарту IPC A-610 «Критерии приемки электронных сборок»). Данная система в сравнении с зарубежными аналогами имеет меньший набор опций пример, чтение маркировки), но решает задачу контроля в условиях предприятий по производству электроники второго класса (бытовые приборы – чайники, утюги и т.д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев, В. Viscom/В. Афанасьев//Вектор высоких технологий. – 2013. – №1. – С. 64-72.
2. Современные системы АОИ. – URL: http://www.ostec-smt.ru/knowledge-base/catalogues-and-brochures/.
3. Technologies – Quad Color. – URL: http://www.visionpro.com/website/MVP_Tri-Color.html.
4. Viscom vision technology. – URL: http://www.viscom.com/europe/products/smd-assembly-aoi/s3088-ultra-high-speed-3d-aoi/.
5. Cyber Optics Technology Leadership. Global Solutions. – URL: http://cyberoptics.com/eai_products_categories/automated-optical-inspection/.

6. MVP Machine Vision Products. – URL: http://www.visionpro.com/website/MVP_AOIProducts.html.
7. Mirtec. – URL: http://mirteceurope.com/products.php.
8. Orbotech. The Language of Electronics. – URL: http://www.orbotech.com/content/eng/556/.
9. Koh Young Technology. – URL: http://kohyoung.com/en/aoi/.
10. Gopel electronic. – URL: http://www.goepel.com/en/optical-inspection/aoi-systems.html.
11. AOI System. Automated Optical Inspection. – URL: http://www.aoisystems.com/products.html.
12. OpenCV. – URL: http://opencv.org/.
13. Fanni, A. Neural Network Diagnosis for Visual Inspection in Printed Circuit/ A. Fanni, M. Lera, E. Marongiu, A. Montisci. – 2013.
14. Liturri, L. Automatic Optical Inspection for the Detection of Printing Shift in Printed Circuit Board/ L. Liturri, G. Brunetti//Progress in Electromagnetic Research Symposium. – Pisa, Italy, 2014.
15. Задорин, А. Ю. Автоматизация визуального контроля качества печатных плат: дис…. канд. техн. наук/ А.Ю. Задорин. – Екатеринбург, 2003.
16. Резниченко, С. В. Аналитическая геометрия в примерах и задачах/ С.В. Резниченко. – М.: МФТИ, 2001. – 576 с.
17. Ucamco. The Gerber Format Specification. – URL: https://www.ucamco.com/downloads.
18. Крауиньш, Д.П. Автоматизированный электропривод/ Д.П. Крауиньш. – ТПУ, 2011. - 128 с.

1. Afanasiev, B. Viscom/B. Afanasiev//High Technology Vector. – 2013. – №1. – pp. 64-72.
2. Modern AOI Systems. – URL: http://www.ostec-smt.ru/knowledge-base/catalogues-and-brochures/.
3. Technologies – Quad Color. – URL: http://www.visionpro.com/website/MVP_Tri-Color.html.
4. Viscom vision technology. – URL: http://www.viscom.com/europe/products/smd-assembly-aoi/s3088-ultra-high-speed-3d-aoi/.
5. Cyber Optics Technology Leadership. Global Solutions. – URL: http://cyberoptics.com/eai_products_categories/automated-optical-inspection/.
6. MVP Machine Vision Products. – URL: http://www.visionpro.com/website/MVP_AOIProducts.html.
7. Mirtec. – URL: http://mirteceurope.com/products.php.
8. Orbotech. The Language of Electronics. – URL: http://www.orbotech.com/content/eng/556/.
9. Koh Young Technology. – URL: http://kohyoung.com/en/aoi/.
10. Gopel electronic. – URL: http://www.goepel.com/en/optical-inspection/aoi-systems.html.
11. AOI System. Automated Optical Inspection. – URL: http://www.aoisystems.com/products.html.
12. OpenCV. – URL: http://opencv.org/.
13. Fanni, A. Neural Network Diagnosis for Visual Inspection in Printed Circuit/ A. Fanni, M. Lera, E. Marongiu, A. Montisci. – 2013.
14. Liturri, L. Automatic Optical Inspection for the Detection of Printing Shift in Printed Circuit Board/ L. Liturri, G. Brunetti//Progress in Electromagnetic Research Symposium. – Pisa, Italy, 2014.
15. Zadorin, A.Yu. Visual Inspection Control of Circuit Board Quality: Thesis of Can. Eng. Degree/ A.Yu. Zadorin. – Yekaterinburg, 2003.
16. Reznichenko, S.V. Automated Geometry in Examples and Problems/ S.V. Reznichenko. – M.: MPTI, 2001. – pp. 576.
17. Ucamco. The Gerber Format Specification. – URL: https://www.ucamco.com/downloads.
18. Krauinsh, D.P. Automated Electric Drive/ D.P. Krauinsh. – TPU, 2011. – pp. 128.

Статья поступила в редколлегию 30.11.2015.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Сведения об авторах:

Аверченков Владимир Иванович, д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета, e-mail:aver@tu-bryansk.ru.
Самсоненко Александр Сергеевич, аспирант Брянского государственного технического университета, e-mail: samsonenkoas@mail.ru.

Averchenkov Vladimir Ivanovich, D.Eng., Prof. Bryansk State Technical University, e-mail:aver@tu-bryansk.ru.
Samsonenko Alexander Sergeyevich, Post graduate student Bryansk State Technical University, e-mail: samsonenkoas@mail.ru.

УДК 621.891
DOI: 10.12737/20285

Е.В. Лемешева, П.В. Тихомиров, А.М. Атрощенко, Н.А. Булхов, М.А. Измеров

НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ

Представлена методика оценки контактной жесткости с помощью нейрокомпьютерного моделирования, позволяющего учесть параметры качества поверхностного слоя. С целью снижения количества входных параметров выполнена замена контактного взаимодействия шероховатых и волнистых поверхностей на контакт гладкого тела с поверхностью, имеющей эквивалентные параметры качества. Получены математические модели для контактной жесткости.

Ключевые слова: контактная жёсткость, стык поверхностей, уравнение регрессии, нейрокомпьютерное моделирование, параметры качества поверхности.

E.V. Lemesheva, P.V. Tikhomirov, A.M. Atroshchenko, N.A. Bulkhov, M.A. Izmerov

NEUROCOMPUTER MODELING OF CONTACT RIGIDITY

Contact rigidity of a joint is one of the main criteria of operability of forest cars. It defines vibration activity and durability of the tightened bolted connections therefore its assessment will allow to predict behavior of technical systems. In work the technique of an assessment of contact rigidity by means of the neurocomputer modeling allowing to consider parameters of quality of a blanket is presented. Results of researches allowed to receive mathematical models for contact rigidity.

In the paper there is presented a procedure of contact rigidity estimate with the aid of neurocomputer modeling. A contact rigidity of a joint is one of the basic criteria of machine and mechanism capacity for work. It defines vibration activity and strength of tightened bolted connections therefore its estimate will allow forecasting the behavior of technical systems. Neurocomputer modeling is a promising method allowing taking into account quality parameters of a surface layer of machinery at the analysis of a deformed state.

Key words: contact rigidity, joint of surfaces, regression equation, neurocomputer modeling, parameters of quality of a surface.

Введение

Контактная жесткость стыка поверхностей является очень важным критерием, описывающим состояние технической системы, и зависит от множества факторов, которые характеризуют качество поверхности сопряженных деталей. Расчеты при конструировании с учетом одного из основных критериев работоспособности - контактной жесткости пока не разработаны [1]. Результаты исследований контактной жесткости [2; 3] носят частный характер, так как они не в полной мере учитывают многообразие параметров качества поверхностного слоя сопряженных деталей и их влияние на контактную жесткость соединений.

Перспективным является подход, использующий методику нейрокомпьютерного моделирования [4; 5]. Исходными данными для такого анализа являются параметры, полученные с помощью автоматизированной системы. Данная система определяет параметры как шероховатости, так и волнистости. Дополнительными параметрами, характеризующими поверхность, были радиусы закругления вершин выступов и волн и высота сглаживания шероховатости. Измерения параметров проводились в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Теоретические основы

Построение модели начинают с графического построения нейронов, слоёв и связей. Используем модель двухслойного персептрона (без учета входной и выходной информации) с сигмоидальной функцией активации (рис. 1). Здесь X_1, X_2, X_3 , ... , X_n - входные данные (параметры качества поверхности); Y'_1, Y'_2,Y'_3 , … , Y'_m - выходные данные (контактная жесткость). С учётом

исходных данных n (число строк в таблицах) в первом и втором скрытых слоях будет по n нейронов.

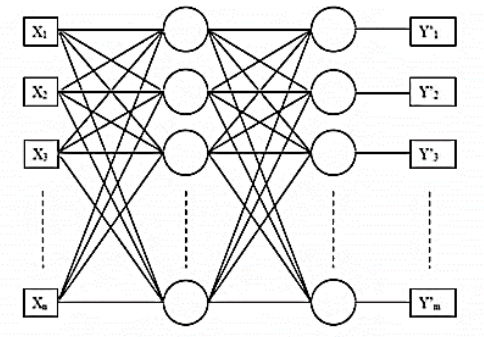


Рис. 1. Архитектура нейросети

Схема простого нейрона представлена на рис. 2. Здесь $S = \sum XiWi$, где Wi – весовые коэффициенты; Xi – входные данные; F – функция активации; выходной сигнал $Yi = \mathrm{OUT} = F(S)$. Для многослойного персептрона получаем следующее выражение:

$$S_{jl} = \sum_i V$$

где i – номер входного сигнала; j – номер нейрона в слое; l – номер слоя.

Выберем для решения задачи определенную функцию активации и подготовим данные для подачи на вход. Линейное преобразование не способно масштабировать основной массив данных и одновременно ограничить диапазон возможных значений этих данных. Естественный выход из этой ситуации – использовать для предварительной обработки данных функцию активации тех же нейронов. Нелинейное преобразование нормирует основной массив данных, одновременно гарантируя, что $\tilde{X}_i \in [0,1]$.

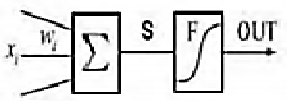


Рис. 2. Схема нейрона

Далее выбирают начальные значения весовых коэффициентов. Выбранные значения должны лежать в рабочей области функции активации. Для этого назначим случайным образом начальные значения из области $(-\frac{1}{2k}, \frac{1}{2k})$, где k – число нейронов в том слое, из которого выходит данный синапс (в модели $k = n$). После обработки данные можно вводить в спроектированную нейронную сеть. При попадании на вход данные суммируются и проходят через функцию активации. Гладкость и непрерывность этой функции – её важные положительные качества. Данная функция симметрична относительно точки (S=0, OUT=1/2). Это делает равноправными значения OUT=0 и OUT=1, что существенно для работы сети.

После предварительных этапов следует начать обучение. Суммарные выходные значения и являются моделируемыми показателями Y'. В ряде случаев следует выполнить корректировку весовых коэффициентов, для чего используют метод обратного распространения ошибки. Для коррекции потребуется частные значения E: $Er = (Y'_r - Y_r)^2/2$.

По алгоритму обратного распространения ошибки весовые коэффициенты рассчитываются так:

$$\Delta W_{ijl} = -\varepsilon \frac{\partial E}{\partial W_{ijl}}; \quad W'_{ijl} = W_{ijl} + \Delta W_{ijl}.$$

Здесь $W'ijl$ – значение веса на следующем шаге обучения; W_{ijl} –значение веса на данном шаге; – скорость обучения. Значение производной рассчитывается для текущих значений параметров W на данном шаге. Обучение происходит до тех пор, пока величина не достигнет приемлемого значения. Обучение проводят на примерах, количество которых составляет 80 % от общего количества экспериментальных данных. Вводя прогностические значения факторов (примеры из оставшихся 20 %), можно получить соответствующие им прогнозные значения показателей и их сравнение с экспериментом.

Геометрические параметры качества поверхности

Параметры шероховатости (определяются в соответствии с ГОСТ 2789-73): Ra – среднее арифметическое отклонение профиля; Rz – высота

неровностей профиля по десяти точкам; *Rmax* – наибольшая высота профиля; *Sm* – средний шаг неровностей; *S* – средний шаг местных выступов профиля; t_p – относительная опорная длина профиля, где *p* – значения уровня сечения профиля.

Параметры волнистости поверхности. Волнистость оценивают двумя параметрами: высотой волнистости *Wz* и шагом волнистости *Sw*.

Высота волнистости *Wz* – это среднее арифметическое из пяти ее значений, определенных на длине участка измерения L_w (рис. 3 а). Средний шаг волнистости S_W – среднее значение расстояний S_{Wi} между одноименными сторонами соседних волн, измеренных по средней линии профиля (рис. 3 б). Положение средней линии определяется так же, как и положение средней линии профиля шероховатости. Указанные параметры шероховатости и волнистости были использованы при оценке качества поверхностей (табл. 1) и контактной жесткости. Физико-механические свойства исследуемых поверхностей были приняты одинаковыми (твердость стальных сопряженных поверхностей составляла 300 НВ).

Задача исследования заключалась в установлении связи параметров шероховатости и волнистости с функциональным назначением данного сочетания поверхностей.

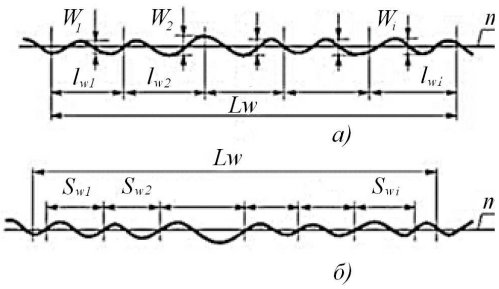


Рис. 3. Определение высоты (а) и шага (б) волнистости

Формирование нейросети

Параметры измерялись с помощью автоматизированной системы [6]. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры шероховатости и волнистости (мкм)

№ образца	Направление OX					Направление OY				
	Шероховатость			Волнистость		Шероховатость			Волнистость	
	R_a	R_p	r	r_w	W_z	R_a	R_p	r	r_w	W_z
1	1,94	6,82	64	3080	3,4	0,61	3,11	98	4590	3,4
2	1,51	6,41	64	3680	7,9	0,61	2,41	294	5780	3,0
3	2,30	7,82	35	7540	8,9	0,49	2,73	310	7640	9,1
4	2,15	6,30	50	8980	8,2	0,82	2,78	72	5680	2,9
5	1,59	5,01	114	3600	8,5	0,88	3,06	230	3600	4,0
6	1,57	4,74	55	6170	8,4	0,68	2,91	96	4950	3,3
7	1,25	5,05	29	5830	7,6	0,90	2,83	704	3700	4,6
8	1,91	7,14	33	9830	8,6	0,86	2,65	279	3840	2,9
9	1,50	2,83	30	3510	5,7	0,88	1,38	165	5470	3,7
10	1,37	3,82	28	2670	7,3	0,45	2,11	55	2910	3,9
11	0,64	2,76	59	6290	3,6	0,35	1,57	131	2460	8,2
12	0,92	2,15	26	3000	6,6	0,76	1,69	310	3630	3,4
13	0,78	2,68	37	2190	3,0	0,36	1,18	44	3560	6,0
14	0,75	2,98	34	2590	4,9	0,31	1,86	146	7050	2,2
15	0,82	3,41	96	3970	7,8	0,56	1,92	108	3180	8,5
16	0,89	3,46	51	3180	4,0	0,45	1,23	242	3480	1,6
17	1,32	3,41	54	3740	6,0	0,58	1,37	499	6440	4,8
18	1,30	4,51	37	4360	7,4	0,61	1,85	67	4200	4,5
19	1,31	3,89	68	4430	5,2	0,83	1,63	328	5010	5,6
20	1,20	1,27	40	3700	9,1	0,36	1,81	45	3600	9,0

Для формирования нейрокомпьютерной сети необходимо знать минимальные и максимальные значения входных факторов, в пределах которых возможно их варьирование (табл. 2).

Таблица 2

Диапазон изменения факторов (мкм)

Фактор	Направление OX		Направление OY	
	Минимум	Максимум	Минимум	Максимум
R_a	0,64	2,30	0,31	0,90
R_p	1,27	7,82	1,23	3,11
r_w	2190	9830	2460	7640
W_z	3,0	9,1	2,2	9,1

Для формирования нейросети в качестве примеров были взяты экспериментальные данные контактной жесткости для разных сочетаний образцов при первом нагружении (табл. 3).

Таблица 3

Формирование нейрокомпьютерной сети

Сочетание образцов	Номинальное давление, МПа				
	3	6	9	12	15
	Контактная жесткость, МПа/мкм				
4/14	2,5	2,5	2,5	2,8	2,5
8/9	1,8	1,2	1,4	1,7	1,8
3/11	1,4	1,5	2,1	2,6	2,6
12/20	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2
18/19	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3
1/7	1,0	1,4	1,4	1,5	1,7
2/13	0,7	1,0	1,2	1,4	1,4
15/16	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3

В соответствии с данными табл. 1 в качестве входных факторов и с учетом направления трассы измерения шероховатости и волнистости имеем для одного сочетания образцов 20 факторов. Интерес представляет сокращение числа факторов без существенной потери полезной информации о топографии поверхностей.

На рис. 4 представлена зависимость контактной жесткости от давления,

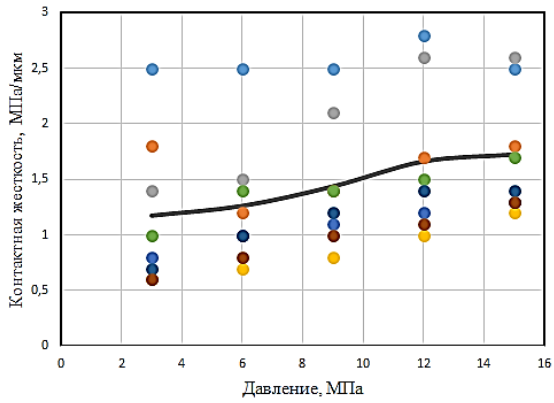


Рис. 4. Зависимость контактной жесткости от давления

построенная на основе данных табл. 3.Как видно из рис. 4, изменение исходных данных по геометрическим параметрам приводит к разбросу выходных данных (контактной жесткости). Сплошная линия на этом рисунке проведена по средним данным. Предварительно можно сделать вывод о том, что в среднем (для данного набора сочетаний) величина контактной жесткости остается практически постоянной. Тем не менее важно учесть и оценить наблюдаемый разброс значений контактной жесткости. С этой целью введем контактную жесткость в качестве дополнительного фактора к эффективным параметрам топографии поверхностей стыка.

Формирование новой нейросети с 4 входными факторами позволяет оценить, насколько корректно введение эффективных параметров топографии сопряженных поверхностей. Для этого сравним результаты, полученные при

тестировании сети с 8 входными факторами (табл. 4) и новой сети с 4 входными факторами.

Параметры приведенной поверхности

Прежде всего выделим те факторы, которые находятся между собой в сильной функциональной связи. Такими факторами являются R_a и R_p. Анализ взятых из табл. 1 данных (40 пар значений) позволил установить коэффициент корреляции, равный $r_{R_a,R_p} = 0,866$ Связь между высотой сглаживания и средним арифметическим отклонением профиля выражается уравнением регрессии

$$R_p = 0,379 + 2,907R_a.$$

Таким образом, в качестве входного фактора используем только параметр R_a.

Приведенные параметры R_{av} и W_{zv} определяются выражениями [8]

$$R_{aV} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{R_{ax}^2 + R_{ay}^2}; W_{zV} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{W_{zx}^2 + W_{zy}^2}$$

Приведенные радиусы закругления вершин неровностей и волн равны:

$$r_V = \sqrt{r_x r_y}; \quad r_{wV} = \sqrt{r_{wx} r_{wy}}.$$

Подобные преобразования позволяют сократить число входных факторов до 8:для каждой из контактирующих поверхностей - $R_{aV}, r_V, r_{wV}, W_{zV}$. Тогда сочетания образцов (табл. 3) выразим через факторы шероховатости и волнистости (табл. 4).

Таблица 4

Приведенные факторы шероховатости и волнистости (мкм)

Сочетание образцов	Факторы образца				Факторы контртела			
	R_{aV}	r_V	r_{wV}	W_{zV}	R_{aV}	r_V	r_{wV}	W_{zV}
4/14	1,62	60	7141	6,15	0,57	70	4273	3,80
8/9	1,48	100	6144	6,42	1,23	70	4382	4,80
3/11	1,66	104	7590	9,00	0,52	88	3934	6,33
12/20	0,84	90	3286	5,25	0,89	42	3650	9,05
18/19	0,56	50	4279	6,12	1,10	149	4711	5,40
1/7	1,44	79	3760	3,40	1,09	143	4644	6,28
2/13	1,15	137	4612	5,95	0,61	40	2792	4,74
15/16	0,70	102	3553	8,16	0,70	111	3327	3,05

Используя табл. 3 и 4, выполним формирование нейросети [4]. Фрагмент обучения сети представлен на рис. 5. Данные, полученные с помощью сформированной сети, сравнивались с имеющимися экспериментальными результатами. С этой целью вводились исходные данные (табл. 5) и с помощью сформированной сети проводилось тестирование. Результаты тестирования приведены в табл. 6.

Таблица 5

Данные для теста(мкм)

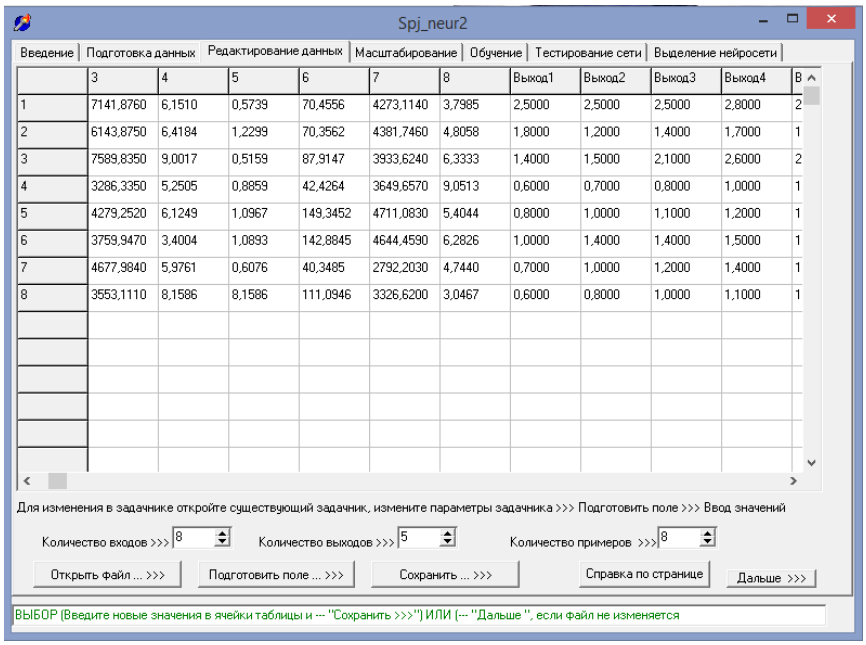
Сочетание образцов	Факторы образца				Факторы контртела			
	R_{aV}	r_V	r_{wV}	W_{zV}	R_{aV}	r_V	r_{wV}	W_{zV}
5/6	1,28	162	3600	6,64	1,21	73	5526	6,38
10/17	1,02	39	2787	5,85	1,02	164	4908	5,43

Таблица 6

Контактная жесткость: результаты тестирования(МПа/мкм)

Сочетание образцов	Контактное давление, МПа				
	3	6	9	12	15
5/6	0,67/1,66	0,80/1,36	0,95/1,34	1,13/1,60	1,26/1,85
10/17	0,84/1,07	1,11/1,54	1,22/1,70	1,24/1,94	1,49/2,03

Примечание. В числителе - данные нейросети, в знаменателе – эксперимент.



	3	4	5	6	7	8	Выход1	Выход2	Выход3	Выход4
1	7141,8760	6,1510	0,5739	70,4556	4273,1140	3,7985	2,5000	2,5000	2,5000	2,8000
2	6143,8750	6,4184	1,2299	70,3562	4381,7460	4,8058	1,8000	1,2000	1,4000	1,7000
3	7589,8350	9,0017	0,5159	87,9147	3933,6240	6,3333	1,4000	1,5000	2,1000	2,6000
4	3286,3350	5,2505	0,8859	42,4264	3649,6570	9,0513	0,6000	0,7000	0,8000	1,0000
5	4279,2520	6,1249	1,0967	149,3452	4711,0830	5,4044	0,8000	1,0000	1,1000	1,2000
6	3759,9470	3,4004	1,0893	142,8845	4644,4590	6,2826	1,0000	1,4000	1,4000	1,5000
7	4677,9840	5,9761	0,6076	40,3485	2792,2030	4,7440	0,7000	1,0000	1,2000	1,4000
8	3553,1110	8,1586	8,1586	111,0946	3326,6200	3,0467	0,6000	0,8000	1,0000	1,1000

Рис. 5. Фрагмент обучения нейросети с 8 входами и 5 выходами (обучение проводилось на 8 примерах)

Качество формирования сети оценим посредством коэффициента корреляции – тесноты связи между экспериментальными данными и величинами, полученными путём нейрокомпьютерного моделирования. Так, на основании табл. 6 имеем для сочетания 5/6 коэффициент корреляции $r_{5/6}$=0,482, а для сочетания 10/17 – 0,954.

Проверим статистическую значимость выборочного коэффициента корреляции для сочетания 5/6. Используем t-критерий Стьюдента при числе пар n=5:

$$t = \frac{0{,}482\sqrt{5-2}}{\sqrt{1-0{,}482^2}} = 0{,}953.$$

При числе степеней свободы f = n – 2 = 3 и уровне значимости 0,05 имеем критическое (табличное) значение критерия

$$t_{кр} = t_{0{,}05;3} = 3{,}18.$$

Так как $t < t_{кр}$, то для этого сочетания отсутствует статистически значимая связь. В других случаях наблюдается сильная связь. Все это свидетельствует о необходимости проведения обучения сети на дополнительных примерах.

Приведение двух взаимодействующих поверхностей к контакту гладкой поверхности с поверхностью, имеющей эффективные показатели качества

При решении многих задач контактной механики выполняют замену контакта сопряженных шероховатых и волнистых поверхностей на контакт гладкой поверхности с поверхностью, имеющей эффективные показатели качества (рис. 6).

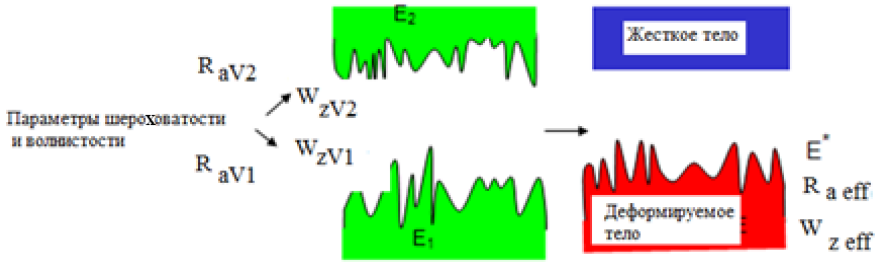


Рис. 6. Приведение двух взаимодействующих поверхностей к контактугладкой поверхности с поверхностью, имеющей эффективныепоказатели качества

Физико-механические свойства деформируемого тела с эффективными показателями качества поверхности определяются выражением

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}.$$

Здесь $\mu_{1,2}$ коэффициенты Пуассона материалов взаимодействующих поверхностей; $E_{1,2}$ модули упругости [7].

Сформированная ранее нейросеть имеет 8 входных факторов. Эта сеть не дает возможности определить аналитическую зависимость контактной жесткости от всех влияющих факторов. Сокращение числа факторов и получение эффективных параметров возможно при использовании ранее полученных результатов.

Параметры эффективной поверхности:

- среднее арифметическое отклонение $R_{aeff} = \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$;
- радиус закругления вершин выступов $r_{eff} = r_1 r_2 / (r_1 + r_2)$;
- радиус волны $r_{weff} = r_{w1} r_{w2} / r_{w1} + r_{w2}$;
- высота волны $W_{zeff} = \sqrt{WR_{z1}^2 + W_{z2}^2}$.

Теперь можно снова сформировать нейросеть с 4 входами и одним выходом (возьмем данные жесткости для давления 9 МПа).

В табл. 7 представлено сравнение данных, полученных экспериментально и с помощью нейрокомпьютерного моделирования. Наибольшее отклонение составило 50 % -для сочетания 4/14. Для других сочетаний расчет и эксперимент находятся в удовлетворительном соответствии. Изменяя значение какого-либо фактора при фиксированных величинах остальных факторов, можно количественно оценить влияние рассматриваемого фактора на контактную жесткость. К недостаткам такого подхода следует отнести: 1) ограничение областей сканирования факторов; 2) невозможность выявить математическую модель и проверить ее адекватность.

Таблица 7

Обучение сети

Процедура	Сочетание образцов	Входные параметры, мкм				Выходные данные - жесткость(МПа/мкм)при номинальном давлении (МПа)		
		R_{aeff}	r_{eff}	r_{weff}	W_{zeff}	3	9	15
Обучение (примеры)	5/6	1,76	50	2180	9,21	1,7	1,3	1,8
	15/16	0,99	53	1718	8,71	0,6	1,05/1,0	1,3
	4/14	1,72	32	2674	7,23	2,5	1,25/2,5	2,5
	8/9	2,18	41	2558	8,02	1,8	1,4	1,8
	2/13	1,30	31	1739	7,61	0,7	1,0/1,2	1,4
	12/20	1,22	29	1729	10,46	0,6	1,05/0,8	1,2
	18/19	1,23	37	2242	8,16	0,8	1,1/1,1	1,3
	1/7	1,81	51	2078	7,14	1,0	1,13/1,4	1,7
Обучение (тест)	3/11	1,74	48	2591	11,00	-	1,33 /2,1	-
	10/17	1,44	32	1778	7,98	-	1,05 /1,7	-

Примечание. В числителе - данные нейрокомпьютерного моделирования, а в знаменателе –результаты эксперимента.

Рассмотрим другую задачу, связанную с получением регрессионной модели.

Уравнение регрессии

Уравнение регрессии связывает выходной параметр - контактную жесткость - с факторами качества сопряженных поверхностей и контактным давлением. Предварительно выберем уравнение регрессии в виде

$$Y = C(X1)^{\alpha}(X2)^{\beta}(X3)^{\gamma}(X4)^{\delta}(X5)^{\varepsilon}.$$

Здесь $X1 = R_{aeff}$; $X2 = r_{eff}$; $X3 = r_{weff}$; $X4 = W_{zeff}$; $X5 = p$ (контактное давление).

Прологарифмировав уравнение регрессии, запишем:

$$lnY = lnC + \alpha ln(X1) + \beta ln(X2) + \gamma(X3) + \delta ln(X4) + \varepsilon ln(X5).$$

Найдем коэффициенты множественной регрессии (α, β, γ, δ и ε) матричным способом. Для этого составим таблицу исходных данных (табл. 8).

Таблица 8

Исходные данные

Сочетание образцов	Вход					Выход (*lnY*)
	ln(X1)	*ln (X2)*	*ln (X3)*	*ln (X4)*	*ln(X5)*	
5/6	0,56	3,91	7,69	2,22	1,09	0,531
15/16	-0,01	3,97	7,45	2,15	2,19	0,262
4/14	0,54	3,46	7,89	1,98	2,71	0,916
18/19	0,21	3,61	7,71	2,09	1,09	-0,223
1/7	0,59	3,93	7,64	1,96	2,19	0,336

Представим экспериментальные данные и коэффициенты модели в матричной форме:

$$lnY = \begin{pmatrix} 0{,}53 \\ 0 \\ 0{,}92 \\ -0{,}22 \\ 0{,}34 \end{pmatrix}; \quad lnX = \begin{bmatrix} 1 & 0{,}56 & 3{,}91 & \dots & 1{,}09 \\ 1 & -0{,}01 & 3{,}97 & \dots & 2{,}19 \\ 1 & 0{,}54 & 3{,}46 & \dots & 2{,}71 \\ 1 & 0{,}21 & 3{,}61 & \dots & 1{,}09 \\ 1 & 0{,}59 & 3{,}93 & \dots & 2{,}19 \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты в уравнении регрессии найдем из решения матричного уравнения

$$B = (X^{*T}X^{*})^{-1}X^{*T}Y^{*}.$$

Здесь $X^{*} = ln\,X$; $Y^{*} = lnY$; $B = (\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon)$

Решение матричного уравнения дает

$$B = (з{,}596;\ 1{,}693;\ 0{,}087;\ -0{,}646;\ 0{,}998;\ 0{,}520)^{T}$$

Тогда

$$\ln Y = \ln 3{,}596 + (\ln R_{aeff})^{1{,}693} + (\ln r_{eff})^{0{,}087} + (\ln r_{weff})^{-0{,}646} + (\ln W_{zeff})^{0{,}998} + (\ln p)^{0{,}52}.$$

Потенцируя, запишем:

$$Y = K_N = 3{,}596(R_{a\,eff})^{1{,}693}(r_{eff})^{0{,}087}(r_{W\,eff})^{-0{,}646}(W_{z\,eff})^{0{,}998}(p)^{0{,}52}.$$

Таблица 9

Сравнение данных расчета и эксперимента

Сочетание образцов	Вход					Выход (Y/Y_x)
	R_{aeff}	r_{eff}	r_{weff}	W_{zeff}	*P*, МПа	
5/6	1,76	50	2180	9,21	3	1,70/1,49
15/16	0,99	53	1718	8,71	9	1,05/1,10
4/14	1,72	32	2674	7,23	15	2,50/2,15
18/19	1,23	37	2242	8,16	3	0,80/0,68
8/9	2,18	41	2558	8,02	3	1,80/1,83
2/13	1,30	31	1739	7,61	9	1,00/1,44
10/17	1,44	32	1778	7,98	9	1,05/1,78

Примечание. Y_x – расчет по полученной формуле.

Максимальное отклонение (сочетание 1/7) составило 58 %.

Проверим адекватность уравнения, используя критерий Фишера

$$F = \frac{S_{aq}^2}{S_y^2}.$$

Оценку дисперсий S_{aq}^2 и S_y^2 выполняют по формулам [9]

$$S_{aq}^2 = \frac{1}{n-k}\sum_{j=1}^{n}(y_j - y_{pj})^2, \quad S_y^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(y_j - \bar{y})^2.$$

Здесь y_{pi} расчетное значение величины Y, вычисленное по уравнению регрессии при подстановке в него значений X_j; n - число опытов; k-количество коэффициентов в уравнении регрессии; $n - k = f$ - число степеней свободы; $\bar{y}$ - среднее арифметическое значение выходного параметра.

Для проверки адекватности используем данные табл. 9. При расчете приняты $n = 7$; $k = 6$. Тогда

$$S_{aq}^2 = \frac{1}{n-k}\sum_{j=1}^{n}(y_j - y_{pj})^2 = \frac{1}{7-6}[(1{,}7 - 1{,}49)^2 + \cdots + (1{,}0 - 1{,}78)^2] = 0{,}911;$$

$$S_y^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(y_j - \bar{y})^2 = \frac{1}{7-1}[(1{,}7 - 1{,},414)^2 + \cdots + (1{,}05 - 1{,}414)^2] = 0{,}371;$$

$$\bar{y} == \frac{9{,}9}{7} = 1{,}414$$

Фактическое значение критерия Фишера Fp = 0,911/0,371 = 2,456. Критическое значение $F_{табл\ (0{,}05;\ 1;\ 6)}$ =5,987. Так как $F_{табл\ (0{,}05;\ 1;\ 6)}$ > Fp, то модель считается адекватной.

Проверку значимости коэффициентов в уравнении регрессии проведем с помощью t-критерия Стьюдента. Доверительный интервал для j-го коэффициента найдем по формуле

$$\Delta B_j = tS(y)/\sqrt{n}.$$

Здесь t – квантиль распределения Стьюдента при числе степеней свободы f=n–1=6, равный 2,45. Тогда $\Delta B_j = 2{,}45\sqrt{0{,}371/\sqrt{7}} = 0{,}564$. В данном случае все коэффициенты значимы, кроме коэффициента при радиусе закругления вершин неровностей и давления.

Оценка парных коэффициентов корреляции подтверждает полученный результат:

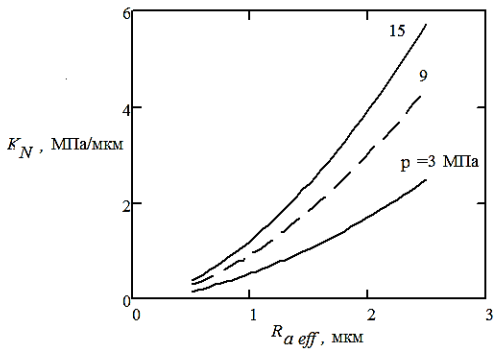


Рис. 7. Зависимости контактной жесткости K_N от эффективного значения среднего арифметического отклонения профиля R_{aeff} при разных величинах контактного давления (при постоянных r_{eff} = 50 мкм, r_{weff} = 2000 мкм, W_{zeff}= 8 мкм)

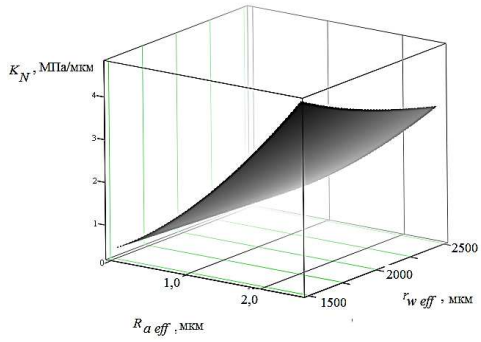


Рис. 8. Зависимость контактной жесткости от среднего арифметического отклонения профиля R_{aeff} и радиуса волны r_{weff}

$$r_{(R_{aeff},y)} = 0,738;$$

$$r_{(r_{tff},y)} = 0,031;$$

$$r_{(r_{weff},y)} = 0,723;$$

$$r_{(W_{zeff},y)} = -0,216;$$

$$r_{(p,y)} = 0,147.$$

На рис. 7 приведены зависимости контактной жесткости K_N от эффективного значения среднего арифметического отклонения профиля R_{aeff} при разных величинах контактного давления.

На рис. 8 представлена зависимость контактной жесткости от среднего арифметического отклонения профиля R_{aeff} и радиуса волны r_{weff} (при постоянных r_{eff} = 50 мкм, W_{zeff} = 8 мкм и p = 9 МПа).

Таким образом, на основании полученных результатов можно установить влияние параметров качества на контактную жесткость стыка.

Выводы:

1.Формирование нейросети позволило установить в неявном виде связь контактной жесткости с 10 геометрическимипараметрами качества сопряженных поверхностей во взаимно перпендикулярных направлениях, учитывающих шероховатость и волнистость.

2. С целью снижения количества входных параметров выполнена замена контактного взаимодействия шероховатых и волнистых поверхностей на контакт гладкого тела с поверхностью, имеющей эквивалентные параметры качества. Адекватность замены подтверждается результатами нейрокомпьютерного моделирования.

3. Получено уравнение множественной регрессии, позволившее выявить связь контактной жесткости с параметрами эквивалентной поверхности. Проведена проверка адекватности модели и значимости коэффициентов уравнения регрессии. Построены графики зависимости контактной жесткости от параметров качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, А.С. Контактная жесткость неподвижных соединений деталей машин: дис…. д-ра техн. наук / А.С. Иванов. – М., 2006. -245 с.
2. Рыжов, Э.В. Контактная жесткость деталей машин/Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1966. – 196 с.
3. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение контактной жесткости соединений/А.Г. Суслов. – М.: Наука, 1977. – 102 с.
4. Тихомиров, В.П. Нейросетевые модели в трибологии/В.П. Тихомиров, П.Ю. Шалимов// Трение и износ. - 2000.- Т.21. - №3.-С. 246-251.
5. Суслов, А.Г. Нейросетевое моделирование процесса формирования эксплуатационных свойств деталей при упрочняющей обработке/А.Г. Суслов, В.П. Тихомиров, П.Ю. Шалимов, А.О. Горленко// Справочник. Инженерный журнал. - 2000.-№10.- С.8-11.
6. Федоров, В.П. Автоматизированная система определения параметров шероховатости поверхностей деталей машин/В.П. Федоров, А.А. Кельнер//Измерительная техника. - 1987. - №12. - С. 23-24.
7. Игнатенко, Ю.В. Расчетно-экспериментальная оценка фактической площади контакта деталей машин/Ю.В. Игнатенко, В.П. Тихомиров, Н.М. Пискленова // Динамика, прочность и надежность транспортных машин. – Брянск: БИТМ, 1992. – С. 135-141.
8. Маккул, Дж. Распределение площади, нагрузок, давления и локального повышения температуры в микроконтактах по модели Гринвуда-Вильямсона/Дж. Маккул// Проблемы трения и смазки. - 1988.-№4. – С. 99-105.
9. Зажигаев,Л. С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента/Л. С. Зажигаев, А. А. Кашьян, Ю. И. Романиков.–М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.

1. Ivanov, Ampere-second. Contact rigidity of motionless connections of details of machines: yew …. Dr.Sci.Tech./Ampere-second. Ivanov. – M, 2006.- 245 p.
2. Ryzhov, E.V. Contact rigidity of details of machines/E.V. Ryzhov. – M.: Mechanical engineering, 1966. – 196 p.
3. Suslov, A.G. Technological support of contact rigidity of connections/A.G. Suslov. – M.: Science, 1977. – 102 p.
4. Tikhomirov, V.P. Neural network models in tribology/V.P. Tikhomirov, P.Yu. Shalimov//Friction and

depreciation. - 2000. - T.21. - No. 3. – P. 246-251.
5. Suslov, A.G. Neural network modeling of process of forming of operational properties of details in case of the strengthening handling/A.G. Suslov, V.P. Tikhomirov, P.Yu. Shalimov, A.O. Gorlenko//Reference book. Engineering magazine. - 2000.-№10. – P. 8-11.
6. Fedorov, V.P. The automated system of determination of parameters of a roughness of surfaces of details of machines/V.P. Fedorov, A.A. Kelner//Measuring equipment. - 1987. - No. 12. – P. 23-24.
7. Ignatenko, YU.V. Settlement and experimental assessment of the actual area of contact of details of machines/Yu.V. Ignatenko, V.P. Tikhomirov, N. M. Pisklenova//Dynamics, durability and reliability of transport vehicles. – Bryansk: BITM, 1992. – P. 135-141.
8. McCool, J. Space assignment, loadings, pressure and local temperature increase in micro contacts on the Grinvuda-Vilyamsonadzh model. McCool//Problems of friction and greasing. - 1988.-№4. – P. 99-105.
9. Zazhigayev, L. S. Planning methods and handlings of results of physical experiment/Hp Zazhigayev, A. A. Kashyan, Yu. I. Romanikov. – M.: Atomizdat, 1978. – 232 p.

Статья поступила в редколлегию 15.09.2015.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Стриженок А.Г.

Сведения об авторах:

Лемешева Елена Викторовна, ассистент кафедры «Технический сервис» Брянского государственного технологического университета, тел.: 8-915-533-84-06.
Тихомиров Петр Викторович, к.т.н., доцент кафедры «Технический сервис» Брянского государственного технологического университета, тел.: 8-910-339-39-88.
Атрощенко Анна Михайловна, доцент кафедры «Экономика и управление на предприятиях лесного комплекса и природопользования» Брянского государственного технологического университета, тел.: 8-910-339-3775.
Булхов Николай Алексеевич, доцент кафедры «Экономика и управление на предприятиях лесного комплекса и природопользования» Брянского государственного технологического университета, тел.: 8-953-271-3154.
Измеров Михаил Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Детали машин» Брянского государственного технического университета, тел.: 8-952-960-17-19.

Lemesheva Elena Viktorovna, assistant to Technical Service department of Bryansk state technological university, ph.: 8-915-533-84-06.
Tikhomirov Victor Petrovich, associate professor "Economy and management at the entities of a forest complex and environmental management" Bryansk state technological university, ph.: 8-910-339-39-88.
Atroshchenko Anna Mikhaelovna, associate professor "Economy and management at the entities of a forest complex and environmental management" Bryansk state technological university, ph.: 8-910-339-3775.
Bulkhov Nikolay Alekseevich, associate professor "Economy and management at the entities of a forest complex and environmental management" Bryansk state technological university, ph.: 8-953-271-3154.
Izmerov Mikhail Aleksandrovich, Cand.Tech.Sci., associate professor of "Detail of machines" of Bryansk state technical university, ph.: 8-952-960-17-19.

УДК 004.056.53:658.5
DOI: 10.12737/20286

М.Ю. Рытов, С.А. Шпичак

МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТУПА К ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ РЕСУРСАМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯМИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Рассмотрен метод обеспечения достоверного доступа к информационным и технологическим ресурсам автоматизированных систем управления предприятиями водоснабжения на основе формальной модели и алгоритма выработки временного аутентификатора доступа.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления, предприятия водоснабжения, управление доступом, аутентификация, информационные ресурсы, технологические ресурсы.

M.Yu. Rytov, S.A. Shpichak

METHOD ENSURING ACCESS TO INFORMATION TECHNOLOGICAL RESOURCES OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM BY WATER SUPPLY COMPANY

The problems of access control to information and technological resources of automatic control systems for water supply companies are considered. The formalized model of the process of reliable access to information and technological resources is shown. The model takes into account the existence of a multitude of communication channels and a possibility of the organization of the operative cross access. A method to ensure a reliable access to information and technical resources of automatic control systems by water supply companies on the basis of the access policy combination, a scheme of deposit and a preliminary distribution of access authenticators. As a base example there was adopted Blom's scheme. The method allows ensuring an operative cross access in case of emergency. To ensure an operative access in the method mentioned there was used a scheme of a complete division of a secret in the combination with authenticator evolution. As a basic example the evolution of authenticators based on Lamport's protocol is considered.

Key words: automatic control systems, water supply company, access control, authentication, information resources, technological resources.

Введение

Современные предприятия водоснабжения (ПВС) относятся к группе критических объектов жилищно-коммунального хозяйства и характеризуются наличием большого количества технологических и информационных ресурсов. Данные ресурсы на практике объединены под управлением автоматизированной системы, включающей в себя следующие компоненты:

- ERP-системы;
- системы управления базами данных;
- дистанционная САУ технологическим оборудованием;
- система связи с мобильными и стационарными объектами;
- система позиционирования мобильных объектов;
- система позиционирования передвижных средств, осуществляющих транспортировку опасных грузов;
- охранно-пожарные системы оповещения.

Управление объектами в системе - директивное, централизованное. Для АСУ ПВС характерно наличие большого количества различных каналов связи: ЛВС, полудуплексная радиосвязь в сочетании с радиомодемами, связь посредством каналов GSM, аналоговая телефонная связь и пр. Присутствуют периодические и систематические отказы в обслуживании в каналах связи. На предприятиях происходит сокращение кадров и возникает система-

тическая нехватка рабочих смен. В результате возникает необходимость обеспечения оперативного перекрестного доступа к технологическим и информационным ресурсам в случае сложных и чрезвычайных ситуаций.

Среда управления определена как доверенная. Циркулирующая в системе технологическая информация не является конфиденциальной, но существует необходимость обеспечения ее доступности, достоверности (аутентичности) и разграничения доступа внутри доверенной среды.

Проведен сравнительный анализ моделей разграничения доступа, изложенных в различных источниках. В работе рассмотрены положения классических моделей разграничения доступа в компьютерных системах: дискреционной, мандатной, ролевой. Также рассмотрена модель разграничения перекрестного доступа [1].

1. Формализованная модель управления достоверным доступом к информационным и технологическим ресурсам АСУ ПВС

На основании сравнительного анализа моделей разграничения доступа выявлено следующее. Модели управления доступом не учитывают дискретный характер доступности ресурсов и абонентов, а также надежность коммуникационных каналов. Существующие модели не учитывают необходимость наличия набора аутентификаторов технологических ресурсов, требующихся для обеспечения достоверности доступа через двухстороннюю аутентификацию пользователя и ресурса. Для осуществления процесса управления доступом к ресурсам АСУ ПВС (рис. 1) предложен ряд методов управления достоверным доступом к информационным и технологическим ресурсам в автоматизированной системе управления ПВС с использованием криптографических протоколов [5;6].

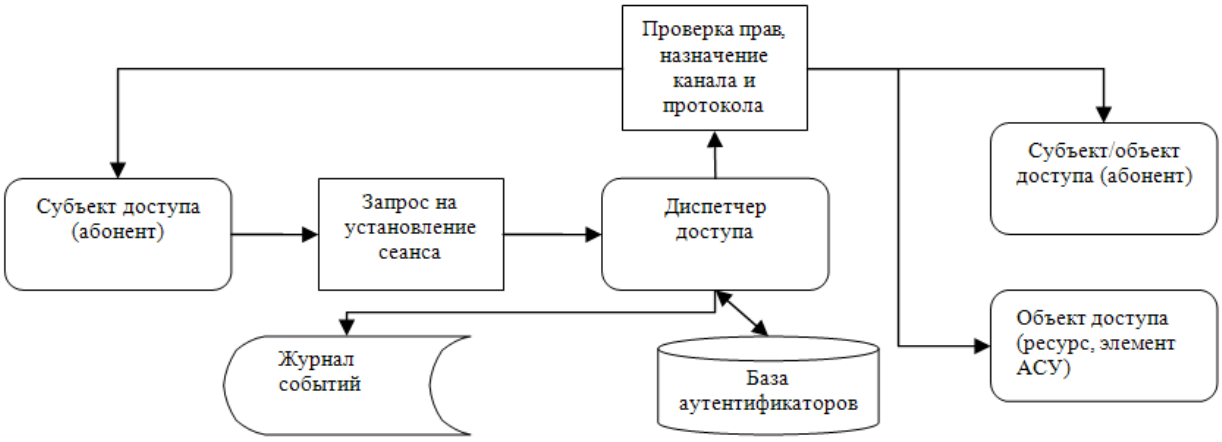


Рис. 1. Процесс обеспечения достоверного доступа к ресурсам автоматизированной системы управления ПВС

С учетом особенностей этого процесса и предыдущих работ в данной области [2–4] была разработана формализованная модель управления достоверным доступом к информационным и технологическим ресурсам АСУ ПВС:

$$M = \langle U, T, S, P, R, Z, G, F \rangle.$$

$U = \{u_1, u_2, ..., u_{uc}\}$ - множество субъектов доступа (пользователей/абонентов), *uc* - количество субъектов доступа. Каждому субъекту соответствует набор уникальных (в рамках пользовательской группы) идентификаторов $I = \{i_1, i_2, ..., i_{ik}\}$ - множество идентификаторов, где *ik* - количество идентификаторов. Идентификаторы служат для однозначного распознавания субъектов среди всех элементов множества *U*. Также каждому субъекту соответствует набор аутентификаторов, с помощью которых возможно подтвердить личность и права субъекта, $A = \{a_1, a_2, ..., a_{ak}\}$ - множество аутентификаторов, где *ak* - количество аутентификаторов. Введены следующие функции:

$user: I \to U$, $id: A \to I$. Они включаются в множество базовых функций системы *F*, т. е. $\{user, id\} \subset F$.

$T = \{t_1, t_2, ..., t_{tc}\}$ - множество информационных и технологических ресурсов (объектов), где *tc* - количество ресурсов. Каждому ресурсу соответствует один или несколько элементов множества коммуникационных каналов $C = \{c_1, c_2, ..., c_{ck}\}$, где *ck* – количество каналов, с соответствующими им наборами протоколов безопасности $K = \{k_1, k_2, ..., k_{kc}\}$, где *kc* – количество протоколов, которые также однозначно связаны с текущим аутентификатором $a_j \in A$. Введено следующее соотношение: $resourses = \{(t_i, k_j, a_j) \mid (i \le tc) \wedge (c_k \in C)\}$.

$S = \{s_1, s_2, ..., s_{sc}\}$ - множество идентификаторов сеанса, где *sc* - количество идентификаторов сеанса. Элемент данного множества создаётся при первом обращении субъекта к объекту, когда субъект проходит идентификацию и аутентификацию. Идентификатор и аутентификатор сохраняются в сеансе и не требуют повторного ввода при обращении к ресурсам. Введены следующие функции: $sid: S \to I$, $suser: S \to U$, $sauth: S \to A$. Они включаются в множество базовых функций системы *F*, т. е. $\{suser, sid, sauth\} \subset F$.

$P = \{p_1, p_2, ..., p_{pc}\}$ - множество прав доступа, где *pc* - количество прав доступа. Это множество содержит все возможные права доступа к ресурсам. Введены следующие отношения: $UP = U \times P$ - отношение, задающее соответствие между субъектами и правами доступа, и $PH = P \times P$ - отношение частичного порядка (иерархия) на множестве прав доступа, обозначаемое «$\succeq$». Введены следующие функции: $permission: U \to 2^P$ - функция, ставящая в соответствие субъекту u_i множество прав доступа,

$permission: (u_i) \subseteq \{p \mid (\exists p_0 \succeq p) \wedge ((u_i, p_0) \in UP)\}$

Они включаются в множество базовых функций системы *F*, т. е. $permission \in F$.

$R = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5\}$ - множество ролей в рамках системы: r_1 - «неавторизованный пользователь», r_2 - «авторизованный пользователь», r_3 - «администратор ресурса», r_4 - «администратор пользовательской группы» и r_5 - «администратор сети». Введены следующие отношения: $UR = U \times R$ - отношение, задающее соответствие между субъектами и ролями, $RP = R \times P$ - отношение, задающее соответствие между ролями и правами доступа, $RH \in R \times R$ - отношение частичного порядка (иерархия) на множестве ролей, обозначаемое «$\succeq$». Введена функция $role: S \to R$, ставящая в соответствие сессии s_i одну из ролей, допустимых в *R*.

$Z = \{z_1, z_2, ..., z_{zc}\}$ - множество серверов доступа, где *zc* - количество серверов доступа, включённых в сеть. Одним сервером доступа могут обслуживаться несколько групп, абонентов, ресурсов, т. е. $z_i = \langle u_i, t_j, g_k \in G \rangle$.

$G = \{g_1, g_2, ..., g_{gc}\}$ - множество пользовательских групп, где *gc* - количество пользовательских групп. Каждый пользователь u_j включается в пользовательскую группу g_i, т. е. $u_i \subset g_i$ для $j \in \{1, ..., uc\}$ и $i \in \{1, ..., gc\}$. Введены следующие функции: $serv: Z \to G$,

$autorization: t_i \times \{permission(u_k) \mid u_k \in U\} \times$
$\times U \to \{ok, access\ denied\}$.

Они включаются в множество базовых функций системы *F*, т. е.

$\{serv, autorization\} \subset F$.

$$F = \left\{ \begin{matrix} user, id, suser, sid, sauth, permission, \\ serv, autorization, role \end{matrix} \right\} -$$

- множество базовых функций системы.

Сформулированы следующие правила:

- Правило взаимодействия пользователей и информационных ресурсов различных рабочих групп, находящихся под управлением системы. Каждому информационному ресурсу ставится в соответствие множество пар $\langle g, privacy \rangle$. В этом случае пользователь имеет доступ к ресурсу, только если ресурс принадлежит домену пользователя и уровень его привилегий доступа больше или равен уровню приви-

легий ресурса. Более формально: пользователь u имеет доступ к ресурсу t, если:

$$\exists\langle g, privacy\rangle \in D_r(t): g \in D_p(u) \wedge privacy \geq access(u),$$

где D_r - оператор получения множества пар, характеризующих ресурс (характеристического множества); D_p - оператор получения множества доменов (иерархии доменов), в которых состоит пользователь; *access* - функция уровня допуска пользователя.

• Правило предоставления оперативного перекрёстного доступа к технологическим ресурсам. Каждому технологическому ресурсу ставится в соответствие множество пар $\langle a, c\rangle$. Доступ осуществляется в том случае, если пользователь авторизован для данного сеанса в канале связи с ресурсом определенным соотношением $resourses$:

$$\exists\langle a, c\rangle \in D_c(t): a \in A, c \in C: a \in sauth(s) \wedge resourses(t, k, a, c),$$

где D_c - оператор получения множества пар, характеризующих используемый канал и протокол связи с ресурсом (характеристического множества).

Данная модель учитывает наличие различных каналов связи с информационными системами и технологическим оборудованием. Кроме того, с целью повышения гибкости управления модель допускает внесение дополнительных ограничений на комбинации компонентов, например ограничения прав доступа субъекта по количеству сеансов или по времени и пр.

2. Базовая структура автоматизированной подсистемы оперативного обеспечения достоверного доступа к информационно-технологическим ресурсам

На основе формализованной модели управления доступом предложена базовая структура автоматизированной подсистемы оперативного обеспечения достоверного доступа к информационно-технологическим ресурсам (рис. 2). Структура подсистемы включает в качестве компонентов, помимо серверов доступа, пользователей и ресурсов, также коммуникационные каналы. В структурной схеме учтена возможность оперативного назначения временного аутентификатора доступа по открытому каналу связи с администратором в случае отказа в штатном канале обслуживания или перекрестного запроса из другой рабочей группы g.

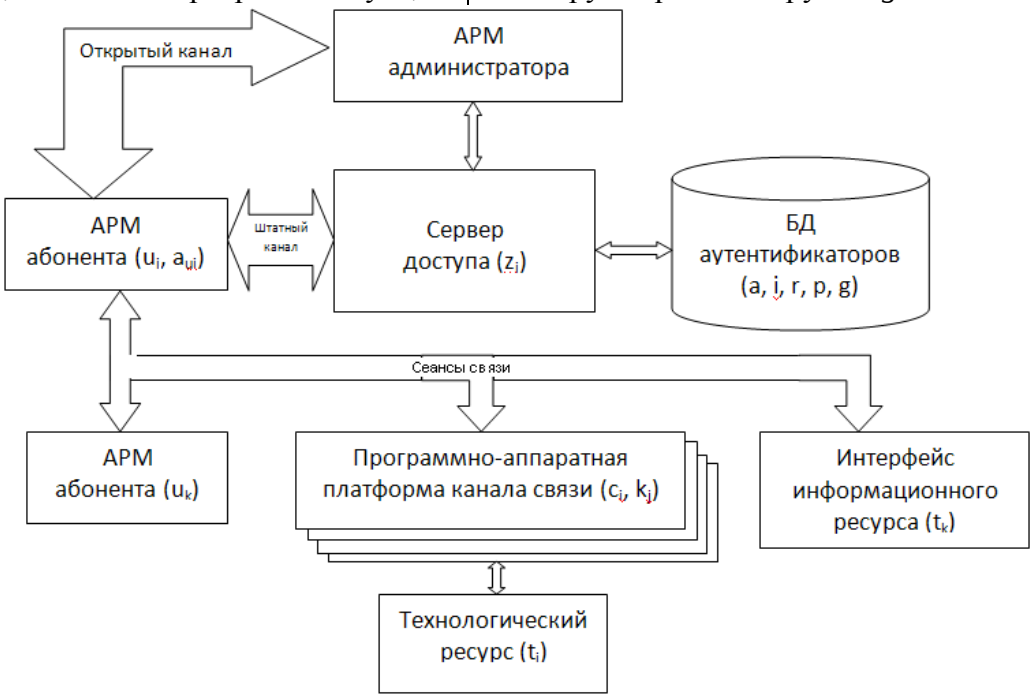


Рис. 2. Структурная схема автоматизированной подсистемы оперативного обеспечения достоверного доступа к информационно-технологическим ресурсам

3. Метод обеспечения доступа к информационно-технологическим ресурсам

На базе формализованной модели и структурной схемы предложен метод обеспечения доступа к информационно-технологическим ресурсам на основе предварительного распределения депонированных аутентификаторов. Данный алгоритм предусматривает комбинированное использование схемы предварительного распределения депонированных аутентификаторов и схемы полного разделения секрета в сочетании с эволюцией аутентификаторов во времени.

В доверенной коммуникационной среде рекомендовано использование уникального идентификатора для связи между каждой парой абонентов, что влечет за собой для сети из n абонентов необходимость генерации и хранения $n(n - 1)/2$ аутентификаторов. Причем каждый из n абонентов должен хранить $n - 1$ аутентификатор. Схема предварительного распределения аутентификаторов позволяет сократить количество аутентификаторов, генерируемых и хранимых в среде автоматизированной системы управления. В качестве базовой схемы предварительного распределения аутентификаторов взята схема Блома [7]. В данной схеме над конечным полем F фиксируется n различных нетривиальных элементов $r_1, \ldots, r_n \in F$, которые приписываются в качестве идентификаторов абонентам сети. Далее выбирается многочлен над полем F степени $2m$, $1 \le m < n$, вида

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{m} a_{ij} x^i y^j,$$

коэффициенты a_{ij} которого образуют симметричную относительно главной диагонали обратимую квадратную матрицу аутентификаторов $\Lambda = (a_{ij})_{m \times m}$ над конечным полем F.

Матрица Λ секретна и депонируется на сервере аутентификации. Каждый абонент A получает в качестве универсального аутентификатора набор $a_0^{(A)}, a_1^{(A)}, \ldots, a_m^{(A)}$, состоящий из коэффициентов многочлена

$$g_A(x) = f(x, r_A) = a_0^{(A)} + a_1^{(A)} x + \ldots + a_m^{(A)} x^m.$$

Для связи между каждой парой абонентов A и B используется уникальный аутентификатор

$$k_{AB} = k_{BA} = f(r_A, r_B) = g_A(r_B) = g_B(r_A),$$

что в конечном итоге позволяет вместо $n - 1$ хранить m аутентификаторов.

В классической схеме Блома идентификаторы находятся в открытом доступе. При использовании же комбинированной (матрично-ролевой) политики доступа целесообразно установить соответствие в матрице доступа между правами абонента, запрашивающего доступ, и идентификатором r_B запрашиваемого информационного ресурса или абонента.

Технологические ресурсы зачастую имеют фиксированный аутентификатор доступа. Кроме того, при организации перекрестного доступа полномочия абонента могут быть ограничены по времени или количеству сеансов. Также возможен отказ в обслуживании по аутентичному (защищенному) каналу связи. Для экстренного предоставления доступа предлагается использовать комбинацию схемы предварительного распределения аутентификаторов и схемы полного разделения секрета (СРС) [8]. Предположим, необходимо предоставить доступ к технологическому ресурсу U, имеющему фиксированный аутентификатор k_U. Сервером аутентификации в данном случае генерируется случайный битовый вектор b длины m:

$$b = (b_0, b_1, \ldots, b_m)_2.$$

Временный аутентификатор r' вычисляется как

$$r' = k_U + \sum_{i=0}^{m} b_i a_i^{(A)} \text{ над полем } GF(2).$$

Вычисленный таким образом временный аутентификатор r' и случайный вектор b передаются абоненту по открытому резервному каналу. Получив их, абонент может восстановить аутентификатор k_U как

$$k_U = r' + \sum_{i=0}^{m} b_i a_i^{(A)} \text{ над полем } GF(2).$$

Аналогичное комбинирование возможно также на основе схемы KDP [6].

Недостаток данной схемы заключается в том, что полученный абонентом A аутентификатор k_U является постоянным. Для прекращения временных экстренных прав доступа абонента A к ресурсу U предлагается использовать эволюцию аутентификаторов технологических ресурсов.

В качестве базового примера, иллюстрирующего эволюцию аутентификаторов, рассмотрим применение протокола одноразовой аутентификации Лампорта [9].

Для каждого технологического ресурса U, имеющего фиксированный аутентификатор k_U, устанавливаются продолжительность действия L_U базового аутентификатора k_U и предполагаемая периодичность замены L_i временных аутентификаторов k_{Ui}. Вычисляется необходимое количество периодов: $t = L_U / L_i$. На базовом шаге протокола используется однонаправленная функция хеширования H. Для текущего i-го периода действия временный аутентификатор k_{Ui} определяется как

$$k_{Ui} = \underbrace{H(H(\ldots(k_U)\ldots))}_{t-i \text{ раз}} = H^{t-i}(k_U).$$

Таким образом, для предоставления временных прав доступа абоненту A передаются сервером аутентификации по открытому каналу связи: случайный двоичный вектор b, период действия аутентификатора L_i, номер периода i , количество периодов t и временный аутентификатор r', вычисленный как

$$r' = \underbrace{H^{t-i}(k_U)}_{k_{Ui}} + \sum_{i=0}^{m} b_i a_i^{(A)} \text{ над полем } GF(2).$$

Получив их, абонент может восстановить действующий в течение периода T_i аутентификатор k_{Ui} как

$$k_{Ui} = r' + \sum_{i=0}^{m} b_i a_i^{(A)} \text{ над полем } GF(2).$$

Алгоритм генерации временного аутентификатора доступа к технологическому ресурсу сервером аутентификации представлен на рис. 3.

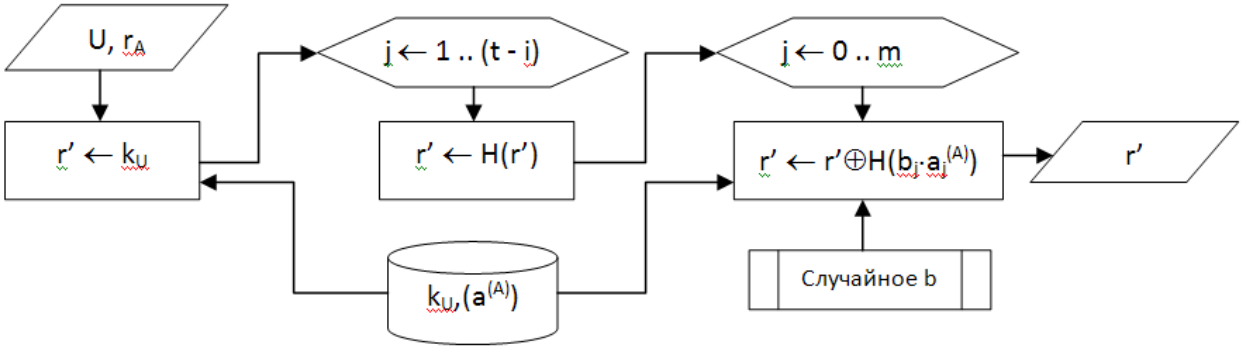


Рис. 3. Алгоритм генерации временного аутентификатора

Ввиду инволютивности операции побитового сложения над полем $GF(2)$ для восстановления временного аутентификатора пользователем используется тот же алгоритм.

Базовыми параметрами системы управления доступом на основе предварительного распределения аутентификаторов являются простое число p – характеристика конечного поля F и m – размерность матрицы аутентификаторов Λ, зависящие от следующих величин:

- битовой длины одиночного аутентификатора $|a_{ij}|$;
- битовой длины свертки используемой хеш-функции $|H(x)|$;
- количества абонентов в сети n.

При этом должны выполняться следующие соотношения:

$$|a_{ij}| \le p \le |H(x)|;\ 1 \le Km < n,$$

где K – коэффициент запаса по числу пользователей.

Заключение

Перспективными направлениями исследования являются доработка метода эволюции аутентификаторов с целью снятия ограничения эволюции по времени (количеству сеансов), а также разработка метода масштабирования матрицы депонированных аутентификаторов. Рассмотренную выше схему депонирования аутентификаторов предлагается масштабировать посредством включения матриц $\Lambda = \left(a_{ij}\right)_{m\times m}$ нижестоящих серверов доступа организации в матрицы вышестоящих серверов путем расширения последних за счет первых вдоль главной диагонали, что увеличивает степень многочлена на $2m$ с включением матрицы каждого сервера аутентификации. Масштабирование системы позволит осуществлять ступенчатое внедрение системы управления доступом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов, А. В. Моделирование процессов информационного обмена с приоритетами в сетях передачи данных промышленных предприятий/ А. В. Демидов, А. И. Офицеров, С. И. Афонин // Информационные технологии в науке, образовании и производстве. – 2010. – Т. 5. – С. 94–101.
2. Еременко, В.Т. Синтез локально-оптимальной структуры классификатора информационных ресурсов по критерию минимума средней длины процедуры поиска/ В.Т. Еременко, А.А. Батенков, И.С. Полянский, К.А. Батенков, М.А. Сазонов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2013. – № 7. – С.3 – 8.
3. Еременко, В.Т. Методологические аспекты синтеза оптимальной древовидной структуры в системах сбора и обработки информации / В. Т. Еременко, И. С. Полянский, И. И. Беседин // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2013.– № 11. – С.15 – 21.
4. Еременко, В.Т. Направления и проблемы интеграции автоматизированных систем управления для предприятий с непрерывным технологическим циклом/ В.Т. Еременко, Д.С. Мишин, Т.М. Парамохина, А.В. Еременко, С.В. Еременко //Информационные системы и технологии. – 2014. – № 3. – С.51 -58.
5. Еременко, В.Т. Метод формирования тестовых комплектов для протоколов безопасности в системах обработки данных/ В.Т. Еременко, В.М.Парамохин // Информационные системы и технологии. – 2015. – № 2 (88). – С. 131-137.
6. Рытов, М.Ю. Криптографическое обеспечение защиты информации: монография/ М.Ю. Рытов, С.А. Шпичак, И.В. Павлинова, Е.И. Павлинова. – Рыбница, 2014. – 220 с.
7. Blom, R. Nonpublic key distribution/R. Blom // Advances in Cryptology: Proceeding of EUROCRYPT’82 Plenum New York. – 1983. - P. 231-236.
8. Dyer, M. On key storage in secure networks/M. Dyer, T. Fenner, A. Frieze, A. Thomason// J. Cryptology. – 1995. – №8. – P. 189 – 200.
9. Lamport, L. Time, Clocks and the Ordering of Events in a Distributed System/ L. Lamport // Communications of the ACM 21 (7). – 1979. – P. 558–565.

1. Demidov, A. V. Simulation of information exchange processes with priorities in networks of data communications of industrial enterprises/ A. V. Demidov, A. I. Ofitserov, S.I. Afonin // Information Technologies in Science, Education and Production. – 2010. – Vol. 5. – pp. 94–101.
2. Yeryomenko, V.T. Synthesis of locally-optimum structure of information resource classifier on minimum criterion of average search duration/ V.T. Yeryomenko, A.A. Batenkov, I.S. Polyansky, K.A. Batenkov, M.A. Sazonov // Bulletin of Computer and Information Technologies. – 2013. – № 7. – pp. 3 – 8.
3. Yeryomenko, V.T. Methodological aspects of synthesis of optimum of tree structure in systems of information collection and processing / V. T. Yeryomenko, I.S. Polyansky, I.I. Besedin // Bulletin of Computer and Information technologies. – 2013.– № 11. – pp.15 – 21.
4. Yeryomenko, V.T. Trends and problems in integration of automatic control systems for enterprises with continuous technological cycle/ V.T. Yeryomenko, D.S. Mishin, T.M. Paramokhina, A.V. Yeryomenko, S.V. Yeryomenko //Information Systems and Technologies. – 2014. – № 3. – pp. 51 - 58.
5. Yeryomenko, V.T. Method of test set formation for protocols of safety in systems for data processing/ V.T. Yeryomenko, V.M. Paramokhin // Information Systems and Technologies. – 2015. – № 2 (88). – pp. 131-137.
6. Rytov, M.Yu. Cryptographic Support of Information Protection: Monograph/ M.Yu. Rytov, S.A. Shpichak, I.V. Pavlinova, E.I. Pavlinova. – Rybnitsa, 2014. – pp. 220.
7. Blom, R. Nonpublic key distribution/R. Blom // Advances in Cryptology: Proceeding of EUROCRYPT’82 Plenum New York. – 1983. - P. 231-236.
8. Dyer, M. On key storage in secure networks/M. Dyer, T. Fenner, A. Frieze, A. Thomason// J. Cryptology. – 1995. – №8. – P. 189 – 200.

9. Lamport, L. Time, Clocks and the Ordering of Events in a Distributed System/ Lamport L.// Communications of the ACM 21 (7). – 1979. – P. 558–565.

Статья поступила в редколлегию 17.12.2015.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Еременко В.Т.

Сведения об авторах:

Рытов Михаил Юрьевич, к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета, e-mail: rmy@tu-bryansk.ru.
Шпичак Сергей Александрович, ст. преподаватель Брянского государственного технического университета, e-mail: frb113@lenta.ru.

Rytov Mikhail Yurievich, Can.Eng., Assistant Prof. Bryansk State Technical University, e-mail: rmy@tu-bryansk.ru.
Shpichak Sergey Alexandrovich, Senior lecturer Bryansk State Technical University, e-mail: frb113@lenta.ru.

УДК 332.02
DOI: 10.12737/20287

А.В. Аверченков, Е.Э. Аверченкова, Д.В. Аксененко

АЛГОРИТМЫ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРТИЗЫ ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА РЕГИОНАЛЬНУЮ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ СОВЕТУЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрен порядок формирования экспертной группы для проведения экспертизы в области оценки влияния внешней среды на региональную социально-экономическую систему. Приведены результаты оценки компетенции экспертов, участвовавших в экспертизе. Авторами сформирован алгоритм оценки силы влияния внешней среды на региональную социально-экономическую систему на основе экспертных оценок, обрабатываемых в советующей информационной системе. Отдельно представлен математический аппарат и алгоритм расчета весов экспертов при формировании базы знаний советующей информационной системы.

Ключевые слова: экспертиза, социально-экономическая система, база знаний, советующая информационная система.

A.V. Averchenkov, E.E. Averchenkova, D.V. Aksyonenko

ALGORITHMS AND ORDER OF EXAMINATION CARRYING OUT ON ESTIMATE OF ENVIRONMENT EFFECT UPON REGIONAL SOCIAL-ECONOMIC SYSTEM FOR KNOWLEDGE BASE FORMATION OF CORRESPONDING INFORMATION SYSTEM

The examination for the estimate of the environment effect upon a regional social-economic system for the formation of a knowledge base of a corresponding information system is a sequence of separate procedures. Expert assessments are processed in the corresponding information system (CIS).

In the paper there is shown an algorithm for a computation of an expert weight at the formation of a knowledge base of a corresponding information system, and also a mathematical apparatus of expert response processing is presented.

The author's experience in the application of the expert assessment method in the estimate of the presence both a connection force between environment, and a regional social-economic system. For the assessment of the effect force as a mathematical apparatus the theory of a fuzzy set was used.

The expert response processing has shown that 487 variants of connections under analysis can be divided into groups of a strong, medium and weal effect taking into account their belonging to the groups S_m . The computation of the concordance factor W and check-up for the expert response co-ordination of this stage of the examination have shown a high degree of co-ordination of expert opinions. The amount of 445 connections obtained as a result of the examination characterizing a strong and medium influence of environment upon a regional social-economic system were loaded into a knowledge base of CIS as the most significant ones. The CIS processes and analyzes examination results after which it offers the selection of concrete measures of a management type allowing either increasing, or grading their influence depending on the context. Therefore, the developed CIS increases the efficiency of processing and analysis of expert assessments, which on the whole ensures effective decision-making by managers and specialists.

Key words: examination, social-economic system, knowledge base, corresponding information system.

Введение

В качестве одного из вариантов поддержки принятия решений на всех уровнях управления целесообразно использовать результаты обработки мнений профессиональных экспертов посредством соответствующего методологического аппарата. В работах Г.Г. Азгальдова, С.Д. Бешелева, В.Г. Горского, Ф.Г. Гуревича, Б.Г. Литвак, А.И. Орлова, Э.П. Райхмана и др. показано, что одним из доступных вариантов обработки мнений коллективного разума является метод экспертных оценок, который позволяет обобщать аргументированные суждения специалистов-экспертов, основанные на их знаниях, опыте и интуиции [3;4;6;8].

Методы экспертных оценок – это методы организации работы со специалистами-экспертами, включающие комплекс логических и математических процедур, направленных на получение от экспертов информации (мнений экспертов), выраженной в количественной и/или качественной форме, ее обработку, анализ и обобщение с целью подготовки и выработки рациональных решений [4].

Основным достоинством использования методов экспертных оценок является относительная простота и доступность для широкого круга пользователей. Практическая интерпретация процедуры проведения экспертизы определяется предметной областью исследования. В данной статье приведены особенности сбора и обработки экспертных оценок влияния внешней среды на региональную социально-экономическую систему. Необходимо отметить, что исследователи встретили некоторые сложности при обосновании количественного и качественного состава участников экспертизы, организации процедуры опроса экспертов, составлении карты экспертной оценки, обработке и интерпретации полученных результатов. Это было связано с неоднозначностью многих социально-экономических явлений в изучаемой системе отношений. Кроме того, особенностью проводимой экспертизы явилось то, что ее результаты заносились и обрабатывались в советующей информационной системе. Таким образом, определение порядка использования экспертных оценок на практике в конкретной предметной области является актуальным.

1. Предметная область проведения экспертизы

Брянскую область, как и другие регионы РФ, можно рассматривать как социально-экономическую систему, т.е. сложную систему взаимосвязанных и взаимодействующих составляющих и отношений между ними [1;2;5]:

$$S = \langle \{S_{mn}:\ m,n \in N, 1 \le m \le 7\}, O \rangle,$$

где S – составляющие региональной социально-экономической системы; S_{mn} – n-я составляющая m-й группы региональной социально-экономической системы; N – множество натуральных чисел; O -набор взаимосвязей, определяющий взаимное влияние S_{mn} друг на друга.

Предлагается разбивка всех составляющих социально-экономической системы Брянской области по следующим группам: S_{1n} - промышленные и производственные составляющие, S_{2n} - общегосударственные цели и политические составляющие, S_{3n} - общеэкономические составляющие региона, S_{4n} - социально-демографические составляющие, S_{5n} - составляющие инвестиционной привлекательности региона, S_{6n} - составляющие инновационного развития региона, S_{7n} - рейтинговые оценки региона [2].

В связи с изменениями в бизнес-среде особое внимание следует уделить взаимодействию региональной социально-экономической системы с внешней средой. Для определения наличия или отсутствия влияния факторов малопрогнозируемой внешней среды на региональную социально-экономическую систему предложена следующая модель [2]:

$$S_{mn} = f(\langle \{F_{ijk}: i,j,k \in N, 1 \le i \le 5\}, V \rangle, G^h = \left\| \langle g_{uy}, G', g' \rangle \right\|_{u=1,y=1}^{67\times 65}),$$

$$g' \Leftrightarrow \forall S_{mn} [S_{mn} \in S \to S_{mn} = f(F)]: m,n \in N, 1 \le m \le 7,$$

где S_{mn} - n-я составляющая m-й группы региональной социально-экономической системы; F_{ijk} – k-й фактор j-й подгруппы i-й группы факторов внешней среды; N - множество натуральных чисел; V – взаимосвязь факторов малопрогнозируемой внешней среды F_{ijk} между собой; G^h – матрица размера 67×65, элементами которой являются кортежи, определяющие оценку h-го эксперта относительно направленного воздействия факторов F_{ijk} малопрогнозируемой внешней среды на

составляющие региональной социально-экономической системы S_{mn}; g_{uy} – элементы кортежа, описывающие наличие связи между F_{ijk} и S_{mn}; $G^{'}$ – сила влияния F_{ijk} на S_{mn}, задаваемая лингвистической переменной; $g^{'}$ - направленность влияния F_{ijk} на S_{mn}; F – множество факторов внешней среды F_{ijk}, определяемое как $F = \{F_{ijk} : i, j, k \in N, 1 \le i \le 5\}$.

Отметим, что i-ю группу факторов внешней среды Брянской области можно представить следующим образом: F_1 - политико-правовые, F_2 - экономические, F_3 - научно-технологические, F_4 - социально-демографические, F_5 - природно-географические факторы.

2. Материалы и методы исследования

В работе использовались такие методы анализа полученной от экспертов информации, как аналитический, статистический, метод экспертных оценок. Наиболее доступным, простым в применении, информативным и достаточно надежным является метод простого анкетирования.

Предлагается последовательность проведения экспертизы, оценивающей влияние внешней среды на региональную социально-экономическую систему, и внесение ее результатов в советующую информационную систему. Этапность формирования группы экспертов, участвующих в проводимой экспертизе, можно представить в виде приведенной на рис.1 схемы.

Рис. 1. Этапы проведения экспертизы, оценивающей влияние внешней среды на региональную социально-экономическую систему

На первом этапе формируется перечень компетенций потенциального эксперта. Среди основных требований к эксперту можно выделить широкий кругозор и знание предметной области, наличие научных трудов и практического опыта, способность решать творческие задачи, независимость мышления и др.

При привлечении экспертов для проведения экспертизы применяются метод назначения, социометрический метод, анализ следов деятельности и подбор экспертов для проекта в существующих базах данных. Необходимо отметить, что отбор экспертов предполагает прозрачность критериев отбора, наличие независимых модераторов проекта, отбирающих экспертов, конфиденциальность процесса отбора экспертов [4].

Экспертная комиссия должна включать специалистов по каждой из изучаемых составляющих региональной социально-экономической системы, при этом в наибольшей степени должно учитываться мнение специалистов именно по тому профилю, к которому имеет отношение оцениваемый показатель. Например, оценка социальных и кадровых составляющих региональной социально-экономической системы подразумевает участие экспертов с глубокими знаниями и опытом работы в области экономики и социологии труда, трудового законодательства, механизма функционирования и регулирования рынка труда. Однако не следует недооценивать других членов экспертной комиссии, которые не обладают высокой компетентностью в данной области, так как нельзя до-

пускать обособленности оценивания отдельных составляющих региональной социально-экономической системы. Это позволит изучить их во взаимосвязи с другими элементами системы [8].

В проводимом исследовании по оценке взаимосвязи внешней среды с региональной социально-экономической системой выделено семь групп таких составляющих. В [3] минимальное количество экспертов предлагается определять по формуле $N = 0{,}5\ (3/\alpha + 5)$, где $0 < \alpha \leq 1$ – параметр, задающий минимальный уровень ошибки экспертизы. Исходя из этого условия минимальное количество экспертов равно 4 (при $\alpha = 1$). Как правило, для группового оценивания необходимо привлечение не менее 7–9 экспертов [6]. В данном исследовании было привлечено восемь экспертов из числа сотрудников администрации региона, которые являются представителями разных уровней ее организационной структуры. На основании работы [7] были сформулированы критерии и шкалы оценки компетенции экспертов. В табл.1 представлены результаты оценки экспертов, привлеченных для проведения экспертизы.

Таким образом, оценив компетентность экспертов, принявших участие в экспертизе, можно сделать вывод, что эксперт 4 получил наибольшую оценку своей компетенции (15 из 20 баллов). Все эксперты набрали больше половины из возможных 20 баллов, следовательно, все они формируют окончательный вариант списка экспертов, участвующих в экспертизе.

Таблица 1

Результаты оценки компетенции экспертов, участвовавших в экспертизе по выявлению силы влияния факторов внешней среды на составляющие региональной социально-экономической системы

Критерии оценки экспертов	Шкала оценки экспертов (в баллах)	Условные номера экспертов							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1. Уровень образования									
- среднее	1								
- среднее специальное	2								
- высшее	3	3	3	3	3	3			3
- наличие ученой степени кандидата наук	4						4	4	
- наличие ученой степени доктора наук	5								
2. Опыт работы по профилю предметной области									
- отсутствует	0								
- от 1 до 3 лет	1								
- от 3 до 5 лет	2								
- от 5 до 10 лет	3	3		3		3			
- от 10 до 20 лет	4		4				4	4	
- свыше 20 лет	5				5				5
3. Административная и экономическая независимость в данной сфере									
- полная независимость	5								
- знаком с работой организации	4								
- работает в той же организации, но непосредственно не влияет на принятие решений	3	3	3	3	3				
- непосредственно в ходе выполнения своих организационных функций связан с организацией	2					2			2
- работает в том же органе принятия решений	1						1	1	
4. Способность решать творческие задачи									
- отсутствует	1								
- низкая	2								
- средняя	3	3		3		3			
- выше среднего	4		4		4				4
- высокая	5						5	5	
Итоговая оценка компетенции привлеченных экспертов, баллов		12	14	12	15	11	14	14	14

На следующем этапе проведения экспертизы, оценивающей влияние внешней среды на региональную социально-экономическую систему, каждый эксперт заполнял анкету, в которой отражалась информация о поле, возрасте, образовании, профессиональном опыте, ключевых знаниях, умениях и навыках в предметных областях. При обработке анкет экспертов учитывалась нормативная правовая база,

регулирующая защиту, сбор и обработку персональных данных, прежде всего Федеральный закон от 27.07.2006 №152-ФЗ «О персональных данных» (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.09.2015).

Ранее в работах [1;2] уже приводились математический аппарат и алгоритмы работы советующей информационной системы (рис. 2). В них особое место занимает процесс расчета весов экспертов, принимающих участие в формировании базы знаний советующей информационной системы (СИС).

Основанием для последующей работы экспертов является формирование классификаторов факторов внешней среды F_{ijk} и составляющих региональной социально-экономической системы S_{mn} [1], информация о которых хранится в базе данных блока диагностики и вывода данных СИС. На базе классификаторов формируется анкета, позволяющая оценить наличие связи между F_{ijk} и S_{mn}, заполнить которую было предложено трем экспертам.

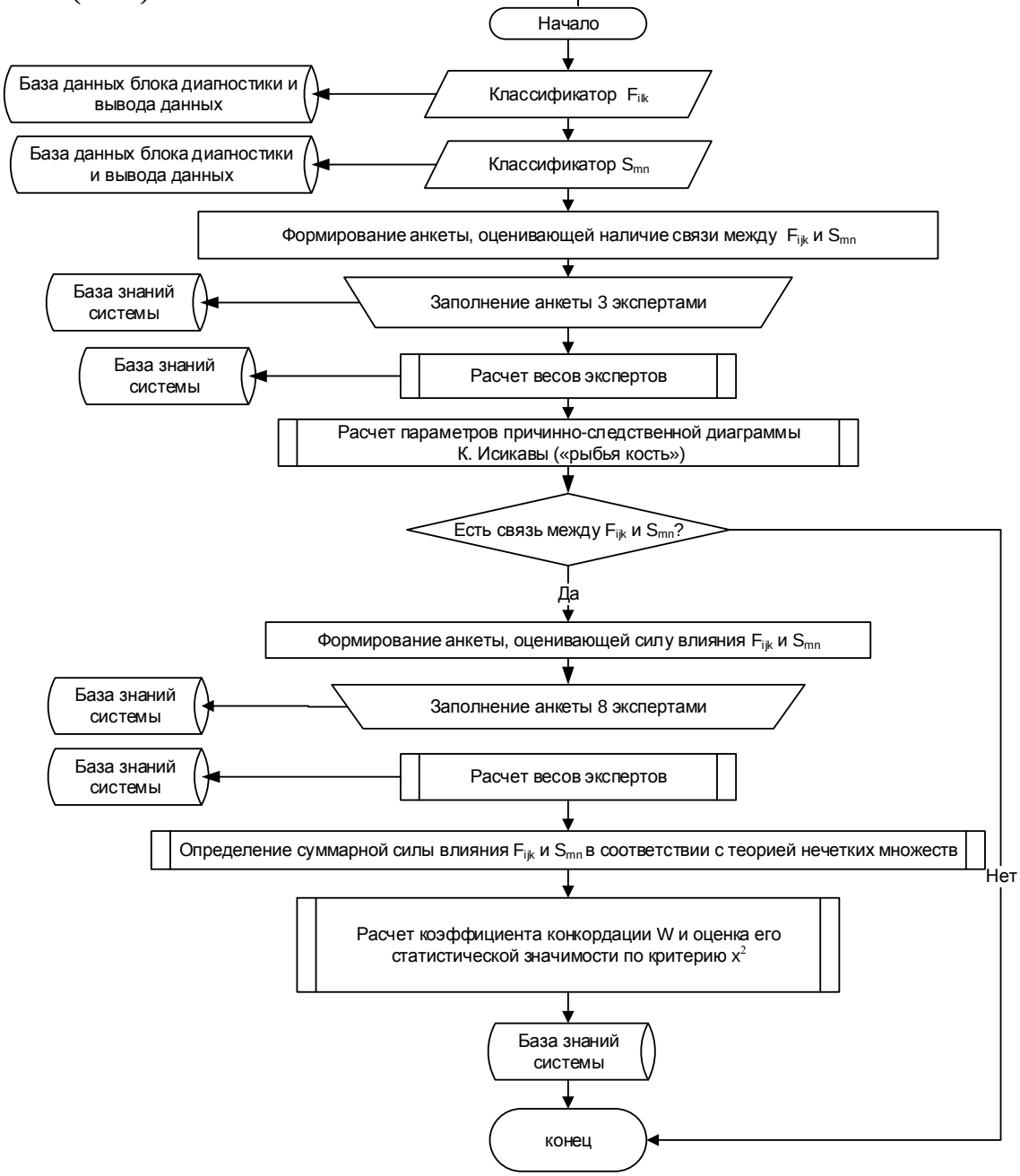


Рис. 2. Блок-схема алгоритма оценки силы влияния внешней среды на региональную социально-экономическую систему на основе экспертных оценок, обрабатываемых в советующей информационной системе

На основании проведенного анкетирования рассчитываются веса экспертов. Ответы и веса экспертов хранятся в базе знаний СИС. С помощью метода построения причинно-следственной диаграммы Каору Исикавы определяется факт наличия значимой связи между F_{ijk} и S_{mn}. Пары, для которых будет выявлено наличие связи между F_{ijk} и S_{mn}, включаются в анкету, оценивающую силу влияния F_{ijk} на S_{mn}.

Данные анкетирования и веса экспертов также хранятся в базе знаний СИС. Далее окончательно определяется суммарная сила влияния F_{ijk} на S_{mn} с учетом весов экспертов. Для каждой связи рассчитывается коэффициент конкордации W и осуществляется проверка на согласованность ответов экспертов, затем оценивается статистическая значимость полученного коэффициента по критерию X^2 [4]. Эта информация также фиксируется в базе знаний СИС.

На рис. 3 приведен алгоритм расчета весов экспертов при формировании базы знаний советующей информационной системы. Основными элементами алгоритма являются расчет относительной ошибки экспертов, расчет весов экспертов с учетом этой ошибки, проверка равенства общей суммы весов экспертов единице и передача данных о весах экспертов в базу данных системы.

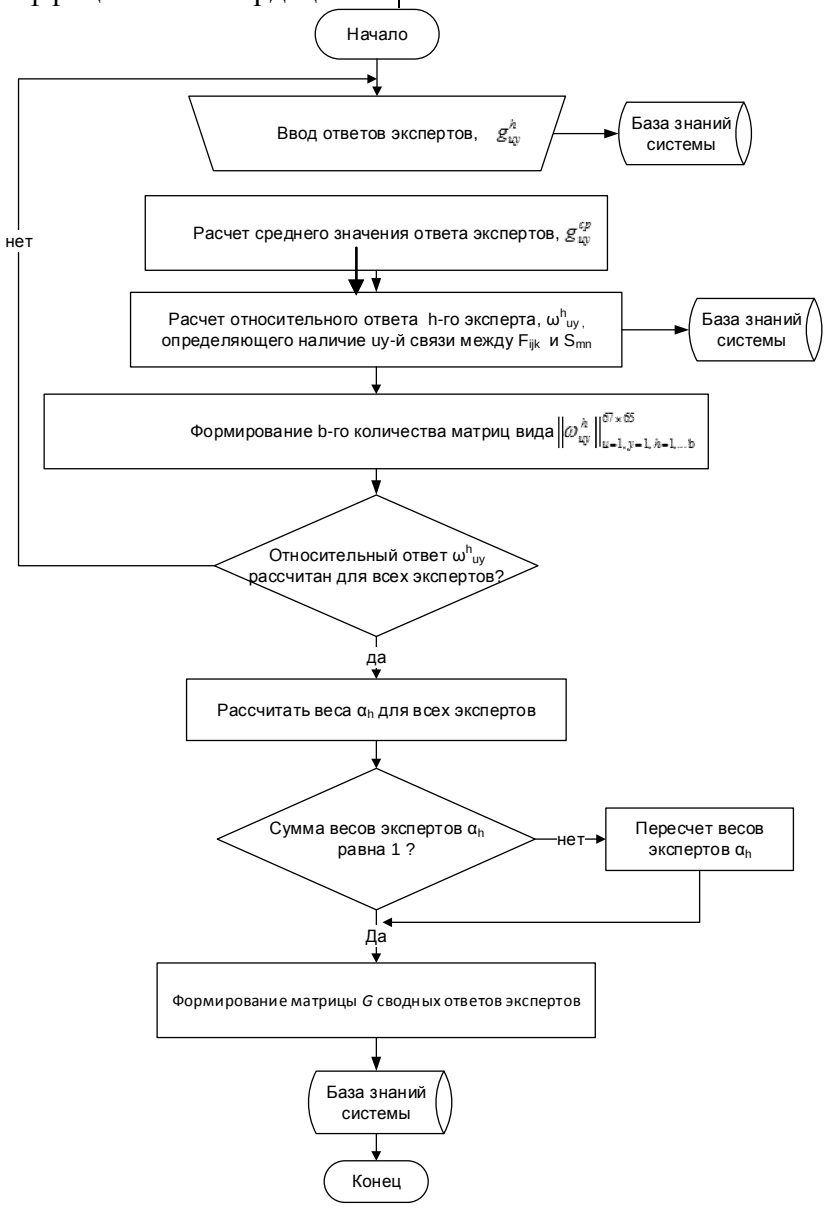


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета весов экспертов при формировании базы знаний советующей информационной системы

Одним из условий работы с экспертами является многократное привлечение одних и тех же экспертов для оценки числовых величин [4]. Относительный ответ *h*-го эксперта, устанавливающего наличие *uy*-й связи между F_{ijk} и S_{mn}, рассчитывается по формуле

$$\omega_{uy}^{h} = \frac{\left| g_{uy}^{cp} - g_{uy}^{h} \right|}{g_{uy}^{cp}}, g_{uy}^{\text{ср}} = \frac{\sum_{h=1}^{b} g_{uy}^{h}}{b},$$

где ω_{uy}^{h} - относительный ответ *h*-го эксперта, определяющего наличие *uy*-й связи между F_{ijk} и S_{mn}; g_{uy}^{h} - текущий ответ *h*-го эксперта, определяющего наличие *uy*-й связи между F_{ijk} и S_{mn}; g_{uy}^{cp} – среднее арифметическое значение показателей g_{uy} в *uy*-й связи между F_{ijk} и S_{mn}; *b* – количество экспертов в экспертизе.

Относительные ответы ω_{uy}^{h} формируют количество *b* матриц вида $\left\| \omega_{uy}^{h} \right\|_{u=1,\, y=1,\, h=1,\ldots \text{b}}^{67\times 65}$, которые позволяют рассчитать α_h - вес *h*-го эксперта, выражающий степень его компетентности. α_h определяется по следующей зависимости:

$$\alpha_h = \frac{\beta_{\text{h}}}{\sum_{h=1}^{3} \beta_{\text{h}}}, \text{ где } \beta_h = \sum_{y=1}^{65} \sum_{u=1}^{67} \omega_{uy}^{h} .$$

Таким образом, вес эксперта определяется по данным предыдущих экспертиз. Однако это требует большого объема информации по проведенным ранее экспертизам. Следовательно, после расчета весов экспертов проводилась нормализация.

Так как компетентность экспертов неодинакова, то предлагается использовать следующую зависимость для формирования матрицы *G* сводных ответов экспертов (с учетом веса эксперта α_h):

$$G = \sum_{h=1}^{3} (\alpha_h \cdot G^h),$$

где *G* – матрица сводных ответов экспертов; α_h – вес *h*-го эксперта.

В заключение по каждой оцениваемой экспертами связи между F_{ijk} и S_{mn} в обязательном порядке рассчитывался коэффициент конкордации Кендалла (согласованности мнений экспертов) *W* и оценивалась его статистическая значимость.

3. Результаты исследования и их обсуждение

Накоплен авторский опыт применения метода экспертных оценок в оценке наличия и силы связи между внешней средой и региональной социально-экономической системой. В частности, при выявлении факта наличия существенной связи между факторами внешней среды F_{ijk} и составляющими региональной социально-экономической системы S_{mn} метод экспертных оценок использовался для построения причинно-следственной диаграммы Каору Исикавы. Количество элементов матрицы G^h равно 4355. Следовательно, требовалось сократить это число до некоторого значения, с которым могут работать высококвалифицированные эксперты из числа руководящих работников администрации региона. Для этого экспертам более низкого ранга (специалистам структурных подразделений администрации региона) предлагалось ответить «да» или «нет» на вопрос: «Имеется ли связь между F_{ijk} и S_{mn}?». Таким образом, на данном этапе определяется не характер связи, а ее наличие.

С использованием причинно-следственной диаграммы Каору Исикавы из 4355 возможных связей между F_{ijk} и S_{mn} было отобрано 487 наиболее существенных, которые в дальнейшем оценивались с точки зрения силы влияния с применением инструментария теории нечетких множеств. Расчет коэффициента конкордации *W* и проверка на согласованность ответов экспертов показали высокую степень согласованности мнений экспертов. Оценка статистической значимости полученного коэффициента проводилась по критерию X^2 ($W = 0{,}81$ при $p < 0{,}001$).

Кроме того, оценить исследуемое влияние G' факторов внешней среды F_{ijk} на составляющие социально-экономической системы региона S_{mn} предлагалось компетентным экспертам из числа сотрудников администрации региона, являющимся представителями разных уровней ее организационной структуры. Влияние составляющих социально-экономической системы региона на факторы внешней среды достаточно сложно оценить точным числовым параметром, поэтому в качестве математического аппарата использовалась теория нечетких множеств. Экспертам предлагалось для каждой составляющей S_{mn} оценить влияние всех факторов F_{ijk} с помощью лингвистических термов «низкое влияние», «среднее влияние», «высокое влияние». Значения термов задавались в виде интервалов. В результате обработки ответов экспертов была сформирована матрица, определяющая силу влияния G'.

Обработка ответов экспертов показала, что 487 вариантов изучаемых связей можно разбить на группы сильного, среднего и слабого влияния с учетом их принадлежности к группам S_m (табл. 2).

Таблица 2

Сводная оценка наличия сильного, среднего или слабого влияния факторов внешней среды, F_{ijk}, на группы составляющих региональной социально-экономической системы, S_m, на основании обработки ответов экспертов

Группы составляющих региональной социально-экономической системы S_m	Группа сильного влияния факторов внешней среды F_{ijk}	Группа среднего влияния факторов внешней среды F_{ijk}	Группа слабого влияния факторов внешней среды F_{ijk}
S_1	24	30	9
S_2	12	83	9
S_3	42	70	1
S_4	25	33	5
S_5	24	24	18
S_6	9	5	0
S_7	19	45	0

Таким образом, доминирование суммы связей сильного и среднего характера (445 из 487 позиций) над слабым влиянием (42 из 487 позиций) подтверждает результативность предыдущей экспертизы.

Расчет коэффициента конкордации W и проверка на согласованность ответов экспертов на данном этапе экспертизы показали высокую степень согласованности мнений экспертов. Оценка статистической значимости полученного коэффициента также проводилась по критерию X^2 (W = 0,79 при p < 0,001).

Заключение

Таким образом, полученные в результате экспертизы 445 связей, характеризующие сильное и среднее влияние внешней среды на региональную социально-экономическую систему, были занесены в базу знаний СИС как наиболее значимые. СИС обрабатывает и анализирует результаты экспертизы, после чего предлагает выборку конкретных мероприятий управленческого характера, позволяющих в зависимости от контекста либо усилить, либо нивелировать их влияние (табл. 3).

Разработанная СИС предназначена для обработки и анализа данных, полученных от экспертов при оценивании влияния внешней среды на региональную социально-экономическую систему, с определением степени согласованности их мнений. Ее функциональные возможности подразумевают ввод и корректировку данных, полученных от экспертов, расчет показателей (усредненного ответа экспертов по каждой взаимосвязи, средней ошибки каждого эксперта, коэффициента вариации, коэффициента конкордации).

Таблица 3

Фрагмент выборки мероприятий, способствующих нивелированию или усилению влияния факторов внешней среды на составляющую региональной социально-экономической системы S_{11} «Производительность труда»

Характер влияния F_{ijk} на S_{mn}: • предполагаемое положительное влияние (код «+»); • предполагаемое отрицательное влияние (код «-»)		Мероприятия M_t, которые будут способствовать: • невелированию влияния F_{ijk} на S_{mn} (код «Н»); • усилению влияния F_{ijk} на S_{mn} (код «Y»)		
Влияющий фактор: F_{133} «Уровень тактического и стратегического менеджмента на промышленных предприятиях в целом по региону и стране»				
«+»	Состояние экономики предприятия региона. Обеспечение экономического роста. Соблюдение гражданских прав населения. Привлекательность отрасли, способность ее к конкуренции	«Y»	M_{11}	Повышение средней заработной платы в регионе
			M_{20}	Техническое перевооружение
			M_{30}	Снижение ставки налогообложения
«-»	Снижение экономического роста. Снижение привлекательности отрасли	«N»	M_{14}	Увеличение объема основного капитала
			M_{51}	Увеличение количества трудовых ресурсов
			M_{60}	Улучшение качества трудовых ресурсов
			M_{17}	Снижение степени монополизации рынка
			M_{18}	Увеличение эффективности кредитно-банковской системы
			M_{29}	Расширение экспортных поставок
Влияющий фактор: F_{143} «Наличие программ государственной поддержки, обеспечивающих устойчивость и стабильность формирования и развития рыночных отношений в регионе и стране в целом»				
«+»	Содействие государства развитию торговых, производственных, научно-технических и информационных связей. Оказание предприятиям административной, финансовой помощи. Подготовка высококвалифицированных специалистов	«Y»	M_{25}	Принятие законов и подзаконных государственных актов, регламентирующих экономическую деятельность
			M_{16}	Регулирование денежно-кредитной системы
«-»	Отсутствие благоприятной среды для развития инновационных предприятий и рыночных отношений в стране и регионе	«N»	M_{36}	Стимулирование разработки инновационных технологий
			M_{11}	Формирование региональных инновационных систем
			M_{53}	Формирование территориально-производственных кластеров, ориентированных на высокотехнологичные производства в приоритетных отраслях экономики, а также ТПК на слабоосвоенных территориях
Влияющий фактор: F_{319} «Зависимость производственной деятельности промышленных предприятий от иностранных материалов и технологий»				
«+»	Замещение импортных материалов отечественными. Развитие производства этих материалов	«Y»	M_{11}	Формирование региональных инновационных систем
			M_{53}	Формирование территориально-производственных кластеров, ориентированных на высокотехнологичные производства в приоритетных отраслях экономики, а также ТПК на слабоосвоенных территориях
			M_{36}	Стимулирование разработки инновационных технологий

Окончание табл. 3

Характер влияния F_{ijk} на S_{mn}: • предполагаемое положительное влияние (код «+»); • предполагаемое отрицательное влияние (код «-»)		Мероприятия M_t, которые будут способствовать: • невелированию влияния F_{ijk} на S_{mn} (код «Н»); • усилению влияния F_{ijk} на S_{mn} (код «Y»)		
«-»	В условиях санкций: сокращение производства, остановка производства, уменьшение количества рабочих мест	«N»	M_{28}	Субсидирование на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, позволяющие реализовывать интеллектуальный потенциал населения региона
			M_{11}	Формирование региональных инновационных систем
			M_{13}	Повышение социальной безопасности, отражающей условия труда, социальное обеспечение и социальную защиту, физическую и имущественную безопасность
			С	Стимулирование роста экспорта

Программой предусмотрена интерпретация полученных результатов экспертизы, а также просмотр и распечатка отчетов о проведенных экспертизах. Дополнительной опцией СИС является функция выделения из экспертной группы тех, чье мнение отличается от мнения большинства (для обоснования их точек зрения). Целевой ориентир СИС – это автоматизация обработки анкетных данных экспертиз, формирования по ним статистической отчетности, поддержки принятия решений руководителями и специалистами на основе формирования комплекса управленческих мероприятий. Кроме того, в возможности СИС заложено повышение достоверности результатов экспертиз путем увеличения количества экспертов. Следовательно, разработанная СИС повышает эффективность обработки и анализа экспертных оценок, что в целом обеспечивает эффективное принятие решений руководителями и специалистами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверченкова, Е.Э. Модель региональной социально-экономической системы, функционирующей в условиях малопрогнозируемой внешней среды, для информационной советующей системы (на примере Брянской области) / Е.Э. Аверченкова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. - № 1 (45). - С. 73-79.
2. Аверченкова, Е.Э. Особенности управления региональными социально-экономическими системами на основе нечеткой логики. Экономические системы современной России: теоретические и практические проблемы развития: кол. моногр. / Е.Э. Аверченкова; под ред. А.Д. Шафронова, Ю.Н. Каткова. – Брянск: Изд-во ООО «Новый проект», 2015. - С. 35-53.
3. Литвак, Б.Г. Экспертные оценки и принятие решений / Б.Г. Литвак. – М. : Патент, 1996. – 298 с.
4. Орлов, А.И. Экспертные оценки / А.И. Орлов // Заводская лаборатория. - 1996. - Т.62. - №1. - С.54-60.
5. Петрова, Е.А. Методологические проблемы и принципы формирования системы оценки эффективности территориального управления с учетом стратегических ориентиров развития / Е.А. Петрова // Экономика региона. - 2014. - №4. - С. 261-270.
6. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: [пер. с англ.] / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
7. Чернышева, Т.Ю. Модель многокритериальной оценки экспертов / Т.Ю. Чернышова // Альманах современной науки и образования. – 2008. - №9. - С. 242–245.
8. Фисунов, К.В. Использование экспертных оценок при принятии управленческих решений /К.В. Фисунов // Теория и практика общественного развития. – 2012. - №19. – С. 12-15.

1. Averchenkova, E.E. Model of regional social-economic system functioning under conditions of low-predictable environment for corresponding information system (by the example of Bryansk region), E.E. Averchenkova // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2015. - № 1 (45). - pp. 73-79.
2. Averchenkova, E.E. Peculiarities in Management of Regional Social-Economic Systems Based on Fuzzy Logic. Economic Systems of Modern Russia: Theoretical and Practical Problems of Development: collective monograph / E.E. Averchenkova; under the editorship of A.D. Shafronov, Yu..N. Katkov. – Bryansk: Publishing House "New Project", 2015. - pp. 35-53.
3. Litvak, B.G. Expert Assessments and Decision-Making / B.G. Litvak. – M. : Patent, 1996. – pp. 298.
4. Orlov, A.I. Expert assessments / A.I. Орлов // Factory Laboratory. - 1996. - Vol.62. №1. - pp. 54-60.
5. Petrova, E.A. // Regional Economy. - 2014. - №4. - pp. 261-270.
6. Saaty, T. Decision-making. Method for Hierarchy Analysis: [transl. from Engl.] / T. Saaty. – M.: Radio and Communication, 1993. – pp. 278.
7. Chernyshova, T.Yu. Model of multi-criterial expert assessment / T.Yu. Chernyshova // Anthology of Modern Science and Education. – 2008. - №9. - pp. 242–245.
8. Fisunov, K.V. Expert assessment use at management decision-making /K.V. Fisunov // Theory and Practice of Social Development. – 2012. - №19. – pp. 12-15.

Статья поступила в редколлегию 10.012.2015.
Рецензент: д.э.н., профессор Брянского государственного технического университета Кулагина Н.А.

Сведения об авторах:

Аверченкова Елена Эдуардовна, к.т.н., доцент кафедры «Экономика, организация производства и управление» Брянского государственного технического университета, e-mail: lena_ki@inbox.ru.
Аверченков Андрей Владимирович, д.т.н., профессор кафедры « Компьютерные технологии и системы» Брянского государственного технического университета, e-mail: mahar@mail.ru.
Аксененко Дмитрий Викторович, аспирант Брянского государственного технического университета, e-mail: aksenenkodmitriy@gmail.ru.

Averchenkova Helen Eduardovna, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Economy, Production Organization and Management" Bryansk State Technical University, e-mail: lena_ki@inbox.ru.
Averchenkov Andrey Vladimirovich, D.Eng., Prof. of the Dep. "Computer Techniques and Systems" Bryansk State Technical University, e-mail: mahar@mail.ru.
Aksyonenko Dmitry Victorovich, Post graduate student Bryansk State Technical University, e-mail: aksenenkodmitriy@gmail.ru.

УДК 004.021
DOI: 10.12737/20288

А.А. Колпаков, Ю.А. Кропотов

АЛГОРИТМ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Представлен разработанный алгоритм повышения производительности гетерогенных многопроцессорных вычислительных систем. Предложено использование графического процессора в качестве дополнительного вычислителя.

Ключевые слова: GPGPU, PRAM-модель, параллельные вычисления, гетерогенные вычислительные системы, графические процессоры.

A.A. Kolpakov, Yu.A. Kropotov

ALGORITHM FOR EFFICIENCY INCREASE OF HETEROGENEOUS MULTI-PROCESSOR COMPUTER SYSTEMS

In the paper there is considered an algorithm developed on the basis of modified PRAM-model for efficiency increase of parallel computations on specialized computer modules.

By means of the efficiency assessment method there were carried out comparative experimental investigations of the algorithm developed. The assessment results of the algorithm for the parallel computation efficiency increase on special computer modules show efficiency increase not less than 2-4 times depending on the number of flows under investigation.

Key words: GPGPU, PRAM-model, parallel computations, heterogeneous computer systems, graphics processors.

Введение

Известно, что повышение эффективности вычислительных компьютерных систем осуществляется в зависимости от организации процесса решения задач [1; 2]. В общем случае задачи представляются параллельными программами и описываются рядом параметров, в числе которых: количество ветвей, ранг необходимой подсистемы, время решения и т.п. Режим функционирования высокопроизводительных вычислительных систем формируется мультипрограммным методом. В некоторых вычислительных компьютерных системах осуществляется частичное применение вычислительных модулей, что в недостаточной степени обеспечивает повышение производительности вычислений [3].

В связи с этим возникает задача разработки методов повышения производительности компьютерных систем на основе модели архитектуры с использованием дополнительных вычислительных модулей или однородных модулей на графических процессорах. Основной задачей повышения производительности такой вычислительной системы является решение проблемы принятия решений о переносе операций вычислений на специализированные вычислительные модули и кэшировании данных, что требует исследований и разработки соответствующих алгоритмов [4].

Архитектура гетерогенных многопроцессорных вычислительных систем

Для рассмотрения особенностей обобщенной архитектуры специализированных вычислительных модулей и их взаимодействия с центральным процессором была разработана и исследована структурная схема архитектуры гетерогенной многопроцессорной вычислительной системы (рис. 1). Базовыми структурными элементами специализированных вычислительных модулей являются спецпамять

(SpRAM), в которой отдельно можно выделить память констант и глобальную память, и множество мультипроцессоров. Чтобы обработать данные на специализированных вычислительных модулях, необходимо передать их из оперативной памяти компьютера в SpRAM в соответствии со структурной схемой архитектуры гетерогенной системы на рис. 1.

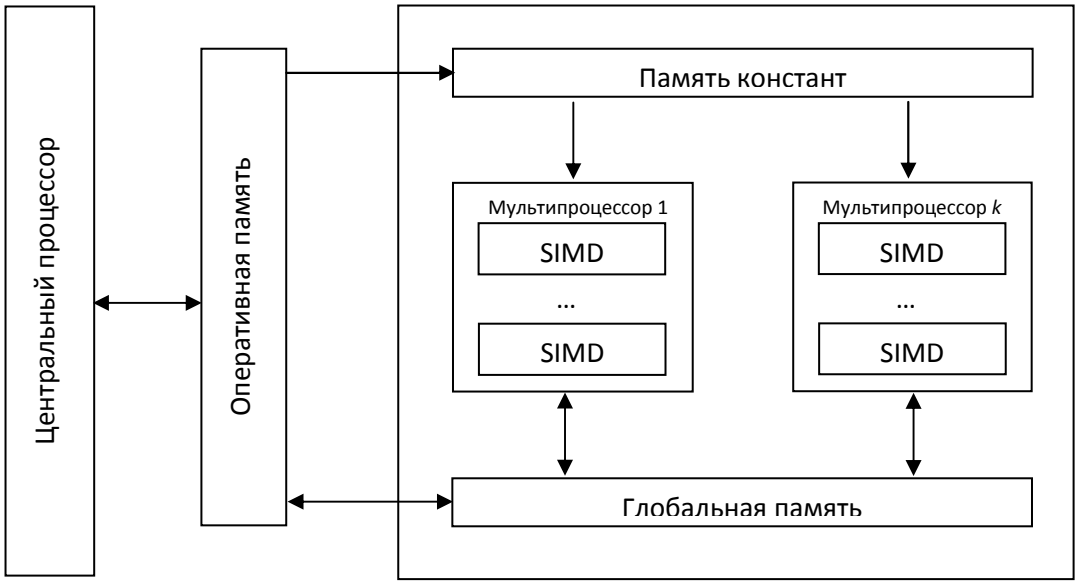


Рис. 1. Структурная схема архитектуры гетерогенной многопроцессорной вычислительной системы

Как видно из структурной схемы, связку «центральный процессор – графический процессор» можно отнести к модели с общей памятью. Основной моделью с общей памятью является модель PRAM (parallel random-access machine) – машина с параллельным произвольным доступом. Она является абстрактной идеализированной моделью параллельной синхронной машины с разделяемой общей памятью, которая использует следующие допущения:

−количество процессоров (q) в машине не ограничено;

−каждый процессор имеет равнозначный доступ к любой ячейке общей памяти, размер которой не ограничен;

−отсутствует конкуренция по ресурсам;

−процессоры работают в режиме MIMD, но в частном случае может использоваться режим SIMD.

Все процессоры исполняют инструкции синхронно, причем выполнение любой инструкции занимает ровно 1 такт, называемый шагом PRAM-машины.

Чтобы оценить время выполнения алгоритма для N элементов входных данных на PRAM-машине с p потоками, было получено выражение

$$T(N,p) = O\left(\frac{W(N)}{p} + S(N)\right), \qquad (1)$$

где O – верхняя асимптотическая оценка трудоёмкости алгоритма; N – количество входных данных алгоритма; $S(N)$ – шаговая сложность алгоритма; $W(N) = \sum_{i=1}^{S(n)} W_i(N)$ – рабочая сложность параллельного алгоритма, ($W_i(N)$ – количество параллельных операций на шаге i).

Формула (1) дает верхнюю асимптотическую оценку времени выполнения алгоритма с шаговой сложностью $S(N)$ и рабочей сложностью $W(N)$.

Следует отметить, что PRAM-модель может быть применена к многопроцессорной системе (рис. 1) с учётом следующих уточнений и дополнений:

1. Все процессоры могут одновременно считывать данные из разделяемой памяти, но запись должна быть монопольной, так как порядок изменения ячейки

разделяемой памяти при обращении на запись из нескольких скалярных процессоров не определён (PRAM – CREW (concurrent read, exclusive write)).

2. Количество скалярных процессоров в графическом мультипроцессоре ограничено сверху (q_{max} процессоров). Для выполнения большего числа потоков используется система горизонтального параллелизма, аналогичная горизонтальной структуре в модели BSP (генерируется расписание последовательного исполнения потоков, разбитых на пучки по q_{warp} скалярных процессоров).

3. Размер разделяемой памяти мультипроцессора ограничен – M_s байт.

4. Все скалярные процессоры работают по принципу SIMD с одинаковой скоростью S_{GPU} элементарных операций в секунду.

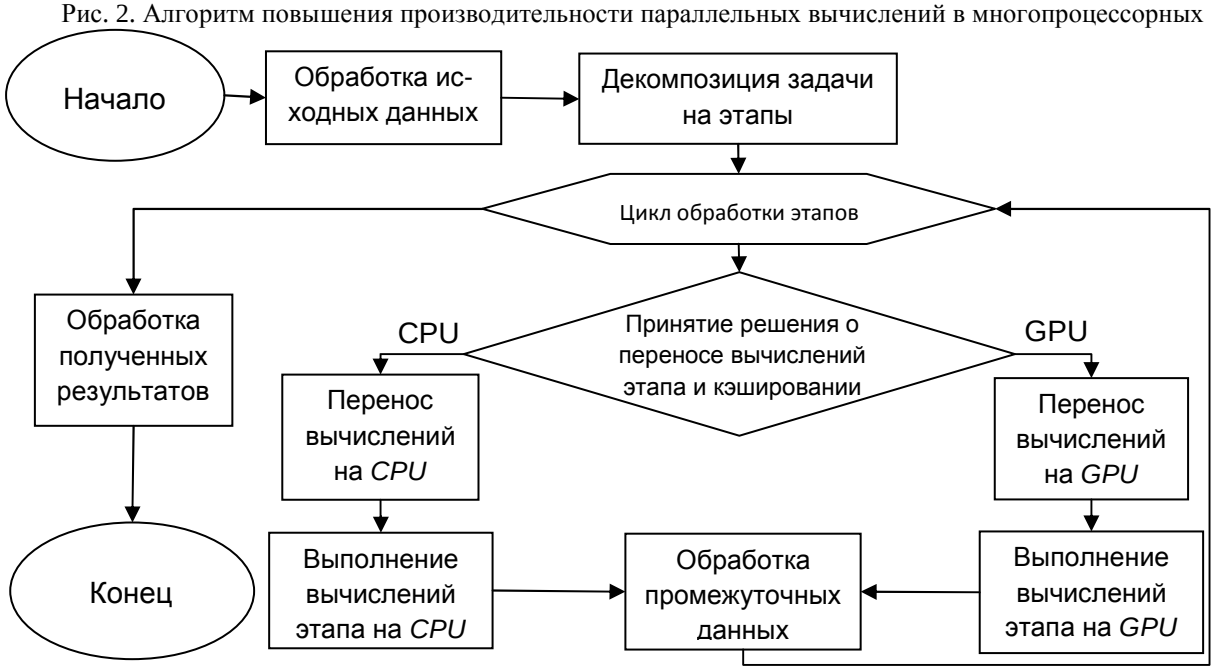
5. Должна быть дополнительная операция – обращение к оперативной памяти SpRAM специализированного вычислительного модуля на чтение или запись. Задержка при обращении K определяется количеством элементарных операций, требуемых при обращении к одному числу одинарной точности в глобальной памяти специализированного вычислительного модуля.

Таким образом, PRAM-модель с перечисленными уточнениями и дополнениями допускает применение графических процессоров в качестве специализированных вычислительных модулей для общих вычислений.

Общий алгоритм оптимизации параллельных вычислений в многопроцессорных вычислительных системах с гетерогенной архитектурой

Для организации параллельных вычислений в многопроцессорных вычислительных системах с гетерогенной архитектурой CPU–SCM был разработан общий алгоритм оптимизации (рис. 2). В качестве специализированного вычислительного модуля используется графический процессор GPU.

Рис. 2. Алгоритм повышения производительности параллельных вычислений в многопроцессорных вычислительных системах с гетерогенной архитектурой



Основным этапом разработанного алгоритма является принятие решения о переносе вычислений этапа на графический процессор. Для осуществления сравнения производительности этапа алгоритма на различных вычислительных устройствах и последующего принятия решения о переносе вычислений используется модифицированная PRAM-модель.

Модифицированная PRAM-модель

В соответствии с моделью специализированного мультипроцессора, которая является общей для всех графических процессоров, сформирован абстрактный вычислительный мультипроцессор. Для абстрактного вычислительного мультипроцессора имеем множество параметров, учитывающих основные характеристики реальных специализированных мультипроцессоров, $\{q_{max}, q_{warp}, M_s, S_{GPU}, K\}$. Для разработки параллельного алгоритма под предложенную модель можно воспользоваться методом создания расписания распределения потоков вычислений, который применяется в базовой PRAM-модели, учитывая изложенные выше уточнения и дополнения. В этом случае формулу (1) для верхней оценки времени выполнения алгоритма на PRAM-машине следует скорректировать. PRAM-модель теперь должна быть представлена в виде одного абстрактного вычислительного мультипроцессора, на котором все скалярные процессоры работают пучками по принципу горизонтального параллелизма. Выражение для вычисления верхней оценки временной сложности алгоритма принимает вид

$$T_C(N,p) = O\left(\frac{W(N)}{p} ceil\left(\frac{p}{q_{warp}}\right) + S(N)\right), \quad (2)$$

где *ceil* – функция округления дроби до ближайшего большего целого числа; p – число потоков алгоритма, предназначенных для обработки N элементов данных, $p < q_{max}$.

Основным объектом исследования является учет операций обращения к глобальной памяти графического процессора. Необходимо ввести дополнительный параметр алгоритма – сложность обращения к глобальной памяти $R(N)$, т.е. суммарное количество обращений на чтение и запись из глобальной памяти графического процессора, требуемое для обработки N элементов данных. Данный вид операций должен присутствовать в любом параллельном алгоритме для графических процессоров, который обрабатывает входные данные. Так как процессоры работают в режиме SIMD и выполняют команды последовательно пучками по принципу горизонтального параллелизма, то формула для верхней оценки времени выполнения параллельного алгоритма на одном абстрактном вычислительном мультипроцессоре принимает вид

$$T_C^{GPU}(N,p) = O\left(\frac{W(N)+R(N)}{p} ceil\left(\frac{p}{q_{warp}}\right) + S(N)\right). \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что более высокая производительность будет у того алгоритма, который будет иметь меньшее количество обращений к SpRAM. Тогда выражение для определения верхней оценки времени выполнения алгоритма на одном абстрактном вычислительном мультипроцессоре имеет вид

$$T_M(N,p) = \frac{W_M(N)+R_M(N)K}{S_{GPU}\,p} ceil\left(\frac{p}{q_{warp}}\right),$$

где $W_M(N)$ – количество элементарных операций одного процессора абстрактного вычислительного мультипроцессора в PRAM; $R_M(N)$ – количество обращений к SpRAM из одного процессора абстрактного вычислительного мультипроцессора в PRAM.

Для учета передачи данных между оперативной памятью и памятью SpRAM следует ввести ещё два дополнительных параметра: суммарное количество входных данных этапа алгоритма в байтах $N`_{HD}$ и суммарное количество выходных данных этапа алгоритма в байтах $N`_{DH}$. Тогда выражение для вычисления общего времени работы этапа алгоритма принимает вид

$$T'_{GPU}(N) = \frac{N'_{HD}(N)}{S_{HD}} + T'_G(N) + \frac{N'_{DH}(N)}{S_{DH}},$$

где S_{HD} и S_{DH} – константы скорости передачи данных между RAM и SpRAM (байт/с).

Полученная модель показывает, что для анализа и сравнения параллельных алгоритмов необходимо использовать следующие параметры алгоритма:

1. Суммарная шаговая сложность

$$S(N) = \sum_{i=1}^{B(N)} S'_i(N). \quad (4)$$

2. Суммарная рабочая сложность

$$W(N) = \sum_{i=1}^{B(N)} W_i'(N) \quad . \quad (5)$$

3. Суммарная сложность обращения к глобальной памяти специализированного вычислительного модуля

$$R(N) = \sum_{i=1}^{B(N)} R_i'(N) \quad . \quad (6)$$

4. Суммарный объём данных, передаваемых между оперативной памятью вычислительной компьютерной системы и глобальной памятью специализированного вычислительного модуля,

$$N_{HD}(N) = \sum_{i=1}^{B(N)} N'_{i\,HD}(N)$$

$$N_{DH}(N) = \sum_{i=1}^{B(N)} N'_{i\,DH}(N) \quad . \quad (7)$$

С учетом выражений (4-7) верхняя оценка времени работы алгоритма на графическом процессоре в среде CPU-GPU вычисляется следующим образом:

$$T_{GPU}(N) = \frac{N_{HD}(N)}{S_{HD}} + \sum_{i=1}^{B(N)} T'_{i\,G}(N) + \frac{N_{DH}(N)}{S_{DH}} \quad . \quad (8)$$

При принятии решения о переносе вычислений на GPU предварительно оценивается время выполнения алгоритма на CPU и GPU в соответствии с выражениями (2) и (8). После этого осуществляется сравнение полученных временных показателей, по результату которого принимается решение о переносе вычислений.

Экспериментальное исследование разработанного алгоритма

В качестве тестовой задачи использовалась задача нахождения нулевых битовых векторов, решаемая с применением генетических алгоритмов [5]. При решении указанной задачи основное время работы занимают параллельные вычисления значений функции приспособленности различных особей, операции скрещивания и мутации. Используемый алгоритм ее решения имеет свойства, характерные для многих генетических алгоритмов:

1. Представление особи в виде битовой строки.

2. Малое число логических операций при вычислении функции приспособленности, выполнении мутации и скрещивания.

3. Последовательный доступ к памяти.

Данные свойства позволяют эффективно применять вычисления на графическом процессоре.

Для проведения экспериментальной оценки эффективности работы алгоритма оптимизации использовалась тестовая компьютерная система следующей конфигурации: центральный процессор Intel Core 2 Quad Q9400 (2.66GHz), ОЗУ 8GB, графическая карта Nvidia GeForce GTX560 2Gb (336 потоков), операционная система Windows 7 x64**,** компилятор MS Visual Studio 2008 (в режиме release).

При исследовании производительности изменялось количество 32-битных целых чисел в массиве (*M*) и число параллельных потоков (*N*).

Определялось среднее время *t*, потраченное на получение нового поколения для различного количества 32-битных целых чисел в массиве и числа параллельных потоков. Исследования проводились с использованием технологий OpenCL и NVIDIA CUDA.

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице.

Таблица

Время генерации (мс) многопроцессорной системой одного поколения (N =10)

Процессор	Количество особей в поколении				
	128	1024	10240	102400	1024000
CPU - Q9400	0,38	0,56	2,5	22,2	416,2
CUDA GPU - GTX460	0,08	0,14	1,03	13	237,4

Как видно из результатов экспериментального исследования, применение разработанного алгоритма оптимизации дает рост производительности относительно центрального процессора: в случае использования NVIDIA CUDA время обработки сокращается с 0,38 мс до 0,08 для 128 потоков и с 416,2 до 237,4 мс для 102400 потоков.

Заключение

Таким образом, на основе модифицированной PRAM-модели разработан алгоритм повышения производительности параллельных вычислений на специализированных вычислительных модулях, который включает в себя алгоритм принятия решения о переносе вычислений на графический процессор.

Методом оценивания производительности были осуществлены сравнительные экспериментальные исследования разработанного алгоритма. Результаты оценивания алгоритма показывают повышение производительности не менее чем в 2-4 раза в зависимости от числа исследуемых потоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воеводин, В.В. Параллельные вычисления: новые концепции в науке и образовании / В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. В 2 т. Т.1. Вычислительная математика. – Наука, 2005. – С.2-15.
2. Graham, R.L. Bounds on Multiprocessing Timing Anomalies / R.L. Graham // SIAM Journal on Applied Mathematics. – 1969. - Vol. 17. - № 2. - P. 416-429.
3. Колпаков, А.А. Аспекты оценки увеличения производительности вычислений при распараллеливании процессоров вычислительных систем / А.А. Колпаков, Ю.А. Кропотов // Методы и устройства передачи и обработки информации. - 2011. – №1(13). – С.124-127.
4. Колпаков, А.А. Теоретическая оценка роста производительности вычислительной системы при использовании нескольких вычислительных устройств / А.А. Колпаков // В мире научных открытий. - 2012. – №1. – С. 206-209.
5. Колпаков, А.А. Оптимизация генетических алгоритмов при использовании вычислений на графических процессорах на примере задачи нулевых битовых векторов / А.А. Колпаков // Информационные системы и технологии. - 2013. – №2(76). – С. 22-28.

1. Voevodin, V.V. Parallel computations: new concepts in science and education / V.V. Voevodin, Vl.V. Voevodin // Modern Problems in Calculus Mathematics and Mathematic Modeling in 2 Vol. / Vol.1. Calculus Mathematics. – Science, 2005. – pp. 2-15.
2. Graham, R.L. Bounds on Multiprocessing Timing Anomalies / R.L. Graham // SIAM Journal on Applied Mathematics. – 1969. - Vol. 17, No. - № 2. - P. 416-429.
3. Kolpakov, A.A. Aspects of assessment of computation efficiency increase at paralleling processors of computer systems / A.A. Kolpakov, Yu.A. Kropotov // Methods and Devices for Information Transfer and Processing. - 2011. – №1(13). – pp.124-127.
4. Kolpakov, A.A. Theoretical assessment of computer system efficiency increase using some computer devices / A.A. Kolpakov // In the World of Scientific Discoveries. - 2012. – №1. – pp. 206-209.
5. Kolpakov, A.A. Genetic algorithms optimization using computations on graphic processors by example of problem of null bit vectors / A.A. Kolpakov // Information Systems and Technologies. - 2013. – №2(76). – pp. 22-28.

Статья поступила в редколлегию 27.01.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Киричек А.В.

Сведения об авторах:

Колпаков Александр Анатольевич, ст. преподаватель Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, e-mail: desT.087@gmail.com.

Кропотов Юрий Анатольевич, д.т.н., профессор Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Kolpakov Alexander Anatolievich, Senior lecturer of Murom Institute (Branch), Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: desT.087@gmail.com.

Кропотов Юрий Анатольевич, D.Eng., Prof. of Murom Institute (Branch), Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

УДК 004.056
DOI: 10.12737/20289

К.Е. Шинаков, М.Ю. Рытов, О.М. Голембиовская, К.В. Чиркова

ОЦЕНКА РИСКА БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ, ОБРАБАТЫВАЮЩИХ КОНФИДЕНЦИАЛЬНУЮ ИНФОРМАЦИЮ

Рассмотрена проблема определения ценности информационных ресурсов, оценка уязвимостей и угроз, а также оценка риска информационной безопасности с учетом обозначенных параметров.

Ключевые слова: информационные системы, конфиденциальная информация, оценка риска безопасности, метод Черчмена - Акоффа.

K.E. Shinakov, M.Yu. Rytov, O.M. Golembiovskaya, K.V. Chirkova

SAFETY RISK ASSESSMENT OF INFORMATION SYSTEMS PROCESSING CONFIDENTIAL INFORMATION

Confidential information processing in information systems under conditions of the universal informatization in both state-owned and private companies is an urgent problem.

Many operators processing a trade secret or personal data underestimate possible damage caused by the disclosure, deletion or change of confidential information and afterwards become victims either of deliberate criminals or suits of workers whose rights were violated. In such a way, the safety risk assessment of confidential information processed in information systems is a priority trend both for an operator and for a subject of confidential information. As a result of the investigation carried out there was developed a procedure for risk assessment of information systems processing confidential information in which it is possible to define and process a critical group of threats, and also a system for the definition of sufficient and the best set of counter-measures among possible ones. At the intermediate and final stage there is defined a significance of an information safety risk witnessing of measures carried out for the assurance of confidential information safety.

Key words: information systems, confidential information, estimate of safety risk, Churchman-Ackoff method.

Обработка конфиденциальной информации в информационных системах в условиях повсеместной информатизации как государственных, так и частных организаций является актуальным вопросом.

Для обеспечения защищенной обработки такой информации используются организационные, программные и технические средства защиты. Однако конечным элементом в последовательности «актив – уязвимость – угроза» является риск. Данный параметр является исчерпывающим и достаточным для качественного определения мер по его устранению или минимизации.

Ввиду этого предлагаемая методика включает в себя следующие этапы:

1. Оценка ценности элементов конфиденциальной информации.
2. Оценка уязвимостей и угроз безопасности конфиденциальной информации.
3. Оценка риска информационной безопасности.

В рамках этапа оценки ценности элементов конфиденциальной информации прогнозируется возможный ущерб от угроз, относящихся к ресурсам, который определяется суммой возможных убытков от недополучения прибыли, штрафов в части нарушения законодательства и стоимости восстановления информационного ресурса.

Таким образом, оценка ценности элементов конфиденциальной информации имеет вид

$$P=p_1+p_2+p_3,$$

где P – итоговый ущерб от угрозы ресурсу; p_1 – ожидаемые потери (убытки, недополучение прибыли); p_2 – максимальный штраф за нарушение законодательства РФ; p_3 – стоимость восстановления ресурса.

Ожидаемые потери p_1 вводятся обладателем информационного ресурса на основе его экспертного мнения.

Для определения p_2 используется табл. 1, содержащая статьи Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях [1], нарушение которых влечёт административное наказание юридического лица.

Таблица 1

Оценка стоимости конфиденциальной информации относительно наложения штрафов в соответствии с законодательством РФ

№	Наименование статьи	Наказание административное (количественное)	Наказание административное (качественное)
1	Статья 13.11. Нарушение установленного законом порядка сбора, хранения, использования или распространения информации о гражданах (персональных данных)	От пяти до десяти тысяч рублей	Отсутствует
…	…	…	…

Для определения p_3:

- данные по обслуживанию продуктов фирмы «1С» были получены из прайс-листа компании «BRG» – официального партнера фирмы «1С» [2];
- данные о стоимости обслуживания прикладного и системного ПО были получены из среднестатистических значений стоимости подобных работ;
- данные о фактической стоимости физического оборудования были получены из среднестатистических значений стоимости конкретных моделей оборудования.

Таким образом, можем сформировать таблицу для определения ущерба (ценности) конфиденциальной информации, фрагмент которой представлен в табл. 2.

Таблица 2

Определение ущерба

Ресурсы	Угрозы	Ожидаемые потери p_1	Максимальный штраф за нарушение законодательства РФ p_2	Стоимость восстановления p_3	Итоговый ущерб от угрозы ресурсу P
База данных сотрудников («1С: Бухгалтерия»)	Угроза утечки информации по каналам ПЭМИН	Заполняется экспертом	25000,00	0,00	25000,00
	Кража, модификация, уничтожение информации	Заполняется экспертом	30000,00	7500,00	37500,00
	Непреднамеренная модификация (уничтожение) информации работниками	Заполняется экспертом	30000,00	7500,00	37500,00
…	…	…	…	…	…

На втором этапе определяется вероятность реализации угроз. Для данного этапа целесообразно определить наличие уязвимостей на объекте.

Вероятность реализации угрозы вычисляется по формуле $V_{ry} = \sum_{i=1}^{n} k_i \, a_i$, где a_i – коэффициент важности. $V_{ry} \leq 1$.

Следовательно, коэффициент важности a_i должен удовлетворять условию $\sum_{i=1}^{n} a_i = 1$.

Для наглядности применения метода за основу было взято предприятие с некими актуальными для него угрозами и соответствующими уязвимостями.

Значение параметра k_i (табл. 3) показывает, актуальна ли данная уязвимость для предприятия: если $k_i = 1$, то уязвимость актуальна; если $k_i = 0$, то уязвимость не актуальна.

Таблица 3

Определение вероятности реализации угроз

№	Угроза	Определение вероятности			Вероятность реализации угрозы V_{ry}
		Уязвимость	Ответ k_i	Коэффициент важности a_i	
1	Угроза утечки акустической информации	Отсутствуют шумогенераторы	0	0,5	0,3
		Индекс звукоизоляции дверей менее 40 дБ	1	0,3	
		Переговорные не проходили аттестацию (проходили более 5 лет назад)	0	0,2	
2	Угроза утечки видовой информации	Отсутствуют жалюзи на окнах	1	0,15	0,9
		Расположение ПК мониторами к окнам	0	0,1	
		Светопропускаемость окон 100%	1	0,4	
		Отсутствует контроль доступа	1	0,3	
		Не регламентирована политика «чистого стола»	1	0,05	
3	Угроза утечки информации по каналам ПЭМИН	Отсутствует экранирование кабельных коммуникаций	1	0,5	0,8
…	…	…	…	…	…

На третьем этапе определяется риск безопасности элементов конфиденциальной информации. За основу для определения меры риска была взята приведенная в [3] матрица (табл. 4).

Таблица 4

Матрица определения риска информационной безопасности

Степень вероятности возникновения угрозы		Низкая			Средняя			Высокая		
Простота использования		Н	С	В	Н	С	В	Н	С	В
Ценность активов	0	0	1	2	1	2	3	2	3	4
	1	1	2	3	2	3	4	3	4	5
	2	2	3	4	3	4	5	4	5	6
	3	3	4	5	4	5	6	5	6	7
	4	4	5	6	5	6	7	6	7	8

Простота использования соответствует коэффициенту важности уязвимости для определенной угрозы.

Разрушение или сбой в работе любого из имеющихся на предприятии активов влечет за собой различные финансовые потери. Именно ввиду этого было принято

решение обозначить баллы ценности, дав им денежные значения.

В ходе исследования и применения различных комбинаций значений ценности активов, степени вероятности возникновения угрозы и простоты использования были определены значения перечисленных параметров.

Промежуточные денежные значения были определены исходя из значений вероятного ущерба *P* для ресурсов. Ценность активов определяется согласно следующей шкале:

0 – 0…5000 рублей;

1 – 5000…10000 рублей;

2 – 10000…50000 рублей;

3 – 50000…100000 рублей;

4 - свыше 100000 рублей.

Промежуточные значения были определены исходя из значений вероятности реализации угрозы V_{ry} (табл. 3).

Степень вероятности возникновения угрозы и простота использования определяются по следующей шкале:

0 – 0,4 – низкая;

0,5 – 0,7 – средняя;

0,8 – 1 – высокая.

Таблица 5

Определение меры риска угроз согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010

Идентификатор угрозы (*a*)	Последствия (ценность актива) (*b*)	Степень вероятности возникновения угрозы (*c*)	Мера риска (*d*)	Ранжирование угроз (*e*)
Угроза A	5	2	10	2
Угроза B	2	4	8	3
Угроза C	3	5	15	1
Угроза D	1	3	3	5
Угроза E	4	1	4	4
Угроза F	2	4	8	3

В табл. 5 приведены 3 основных параметра:

b – величина, соответствующая ущербу от повреждения или разрушения актива (оценивается в баллах и соответствующих им денежных единицах);

c – величина, соответствующая вероятности возникновения угрозы;

d – величина, показывающая, насколько опасна угроза для предприятия.

Данные параметры были определены согласно табл. 6 и соответствующим значениям шкал ценности активов, вероятности возникновения угрозы и простоты использования.

Столбец «Ранжирование угроз» было решено не использовать, так как сравнение проводится не между отдельными угрозами, а между группами угроз: «Конфиденциальность», «Целостность (изменение)», «Целостность (удаление)», «Доступность».

Таблица 6

Определение меры риска угроз

Идентификатор угрозы (*a*)	Последствия (ценность актива) (*b*)	Степень вероятности возникновения угрозы (*c*)	Мера риска (*d*)	Возможный ущерб для предприятия, руб.
Угроза утечки акустической информации	0	0,3	0	0,00
Угроза утечки видовой информации	0	0,9	8	0,00
Угроза утечки информации по каналам ПЭМИН	2	0,8	8	25000,00
Кража физических ресурсов	2	0,72	16	43200,00
…	…	…	…	…
Общий показатель	34	19,33	207	1134422,00

Для минимизации риска было принято решение о выделении критичной группы угроз из перечня и применении контрмер для их нейтрализации.

Для сравнения групп угроз между собой выбран метод Черчмена - Акоффа, который предполагает последовательную корректировку оценок, указанных экспертами.

Согласно методу Черчмена - Акоффа, альтернативы ранжируются по предпочтительности [4].

В качестве альтернатив α_i были определены несколько промежуточных параметров, характеризующих группы угроз: ценность актива, степень вероятности возникновения угрозы, мера риска и возможный ущерб (табл. 7).

В качестве оценок альтернатив $\varphi(\alpha_i)$ были определены два параметра, по которым и проводилось сравнение групп угроз: вероятный ущерб и коэффициент риска.

Коэффициент риска – показатель, определяющий критичность группы угроз и объединяющий все показатели данной группы, кроме возможного ущерба.

$$K_r = \frac{b+c+d}{\text{кол-во угроз группы}}.$$

Вероятный ущерб – ущерб, который будет нанесен предприятию в случае осуществления угроз.

$$P_{vr} = \frac{p}{c}.$$

Таблица 7

Сравнение показателей для групп угроз

Группа угроз	Последствия (ценность актива) (*b*)	Степень вероятности возникновения угрозы (*c*)	Мера риска (*d*)	Возможный ущерб (*p*)	Вероятный ущерб P_{vr}	Коэффициент риска K_r
Начальные значения	34	19,33	207	1134422,00	58687,00	9,64
Конфиденциальность	21	15,27	139	478502,00	31336,00	7,96
Целостность (изменение)	13	8,25	75	207577,00	25160,00	8,02
Целостность (удаление)	34	12,63	156	1072778,00	84938,00	11,25
Доступность	24	8,4	99	871523,00	103752,00	10,95

Критичную группу угроз определяем по соотношению коэффициента риска и вероятного ущерба.

Наибольшие значения коэффициента риска имеют группы угроз «Целостность (удаление)» и «Доступность».

Угрозы группы «Доступность» имеют наибольшее значение вероятного ущерба, следовательно, эту группу примем за критичную.

На следующем этапе оценивается эффективность контрмер (путем сравнения их между собой) и осуществляется ранжирование по эффективности:

1-***** (наилучшие);
2-**** (хорошие);
3-*** (средние);
4-** (посредственные);
5-** (недостаточно эффективные).

Пример ранжирования контрмер для уязвимости «Отсутствуют камеры видеонаблюдения» представлен в табл. 8.

Таблица 8

Ранжирование контрмер для уязвимости «Отсутствуют камеры видеонаблюдения»

Отсутствуют камеры видеонаблюдения			
Характеристики	VidStar VSV-2120VR-AHD (вариофокальная купольная видеокамера)*****	VidStar VSD-2360FR-AHD (купольная видеокамера)****	VidStar VSD-1361FR-AHD (купольная видеокамера)***
Тип корпуса	Купольный	Купольный	Купольный
Климатическое исполнение	Уличное	Внутреннее	Внутреннее
Антивандальное исполнение	Нет	Нет	Нет
Разрешение камеры	2 Мрх	2 Мрх	1,2 Мрх
Тип объектива	Вариофокальный	Фиксированный	Фиксированный
Изображение	Цветное	Цветное	Цветное
Ночной режим	Да	Да	Да
Стоимость	4200,00	3690,00	3240,00

В табл. 9 каждой угрозе и соответствующим ей уязвимостям сопоставляются несколько вариантов контрмер с указанием их стоимости.

Таблица 9

Контрмеры для угроз группы «Доступность»

№	Угроза	Определение контрмер			
		Уязвимость	Ответ k_i	Контрмера	Стоимость контрмеры, руб.
4	Кража физических ресурсов	В двери не вмонтированы замки	0	Врезка замков	2000,00 на 1 дверь
		Отсутствуют камеры видеонаблюдения	1	VidStarVSV-2120VR-AHD (вариофокальная купольная видеокамера)	4200,00
				VidStarVSD-2360FR-AHD (купольная видеокамера)	3690,00
				VidStar VSD-1361FR-AHD	3240,00
		Отсутствуют датчики движения	1	SRDT-15 (комбинированный (ИК+ СВЧ) детектор)	2562,00
				MR-CRT (пассивный ИК - детектор)	2013,00
				«Астра-5 А» (ИО-409-10)	551,00
				«Рапид» (ИО-409-28)	390,00
				M-903D	331,00
		Отсутствуют магнитоконтактные детекторы	0	ИО 102-4 (миниатюрный)	80,00
				ИО-102-5 (миниатюрный, врезной)	74,00
				ИО102-2 (СМК-1) (накладной)	40,00
		Отсутствуют датчики разбития окон	1	GBD-2 (детектор разбития стекла)	1000,00
				DG457 Glasstrek (акустический датчик разбития стекла)	2560,00

На заключительном этапе оценивается остаточная мера риска после применения контрмер для угроз группы «Доступность» (табл. 10).

Таблица 10

Определение остаточной меры риска после устранения угроз группы «Доступность»

Идентификатор угрозы (*a*)	Последствия (ценность актива) (*b*)	Степень вероятности возникновения угрозы (*c*)	Мера риска (*d*)	Возможный ущерб (*p*)
Угроза утечки акустической информации	0	0,3	0	0,00
Угроза утечки видовой информации	0	0,6	3	0,00
Угроза утечки информации по каналам ПЭМИН	2	0,8	5	25000,00
Утрата ключей и атрибутов доступа	0	0,5	1	1781,00
Разглашение информации, модификация, уничтожение работниками, допущенными к ее обработке	3	1	16	64669,00
Перехват за пределами контролируемой зоны	0	0,55	3	0,00
Перехват в пределах контролируемой зоны внешними нарушителями	0	0,1	0	0,00
Перехват в пределах контролируемой зоны внутренними нарушителями	0	0,8	6	0,00
Угрозы сканирования, направленные на выявление типа или типов используемых операционных систем, сетевых адресов, открытых портов и служб, соединений и др.	0	0,11	0	0,00
Общий показатель	5	4,76	34	91450,00

В результате проведенного исследования была разработана методика оценки риска безопасности информационных систем, обрабатывающих конфиденциальную информацию, в которой имеется возможность определения и обработки критичной группы угроз, а также методика определения достаточного и наилучшего из возможных наборов контрмер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 №195-ФЗ (ред. от 31.12.2014) (с изм. и доп., вступ. в силу с 11.01.2015).
2. Официальный сайт «Bussines relationship group».-Режим доступа: http://www.brg-consulting.ru/.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности.
4. Методы качественного оценивания систем. Методы экспертных оценок // Научная энциклопедия Book-Science. - Режим доступа: http://book-science.ru.

1. Code of the Russian Federation of Administrative Delinquency of 30.12.2001 №195-ФЗ (ed. от 31.12.2014) (withchanges and supplements came into force since 11.01.2015).
2. Official website “Business relationship group”.- access mode: http://www.brg-consulting.ru/.
3. SARS RF ISO/IEC 27005-2010. Information technology. Methods and means of information safety support. Management of information safety risk.
4. Methods of system quality assessment. Methods of expert assessments // Scientific Encyclopedia Book-Science. – Access mode: http://book-science.ru.

Статья поступила в редколлегию 18.02.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Лозбинев Ф.Ю.

Сведения об авторах:

Шинаков Кирилл Евгеньевич, ассистент кафедры «Системы информационной безопасности» Брянского государственного технического университета, e-mail: nirsamy-bgtu@yandex.ru.
Рытов Михаил Юрьевич, к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета, e-mail: rmy@tu-bryansk.ru.
Голембиовская Оксана Михайловна, к.т.н., доцент кафедры «Системы информационной безопасности» Брянского государственного технического университета, e-mail: nirsamy-bgtu@yandex.ru.
Чиркова Ксения Вячеславовна, студент группы 13-БАС кафедры «Системы информационной безопасности» Брянского государственного технического университета, e-mail: nirsamy-bgtu@yandex.ru.

Shinakov Kirill Eugenievich, Assistant of the Dep. “Information Safety Systems” Bryansk State Technical University,
e-mail: nirsamy-bgtu@yandex.ru.
Rytov Mikhail Yurievich, Can.Eng., Assistant Prof., Bryansk State Technical University, e-mail: rmy@tu-bryansk.ru.
Golembiovskaya Oksana Mikhailovna, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Information Safety Systems” Bryansk State Technical University, e-mail: nirsamy-bgtu@yandex.ru.
Chirkova Ksenia Vyacheslavovna, Student of 13-BAS group of the Dep. “Information Safety Systems” Bryansk State Technical University, e-mail: nirsamy-bgtu@yandex.ru.

УДК 004.056
DOI: 10.12737/20290

М. Ю. Рытов, Е.В. Лексиков, П.А. Ковалев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОРТАЛОВ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОРГАНОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВЛАСТИ

Рассмотрены проблемы проведения аудита информационной безопасности (ИБ) информационных порталов региональных органов исполнительной власти. Приведен алгоритм разработки информационного портала. Предложен метод проведения аудита ИБ организации на основе метода нечеткого моделирования и построения нечетких когнитивных карт. Рассмотрена процедура применения аппарата нечетких когнитивных карт к решению задачи оценки обеспеченности ИТ-стратегии. Описан процесс формирования нечетких моделей.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления, региональные органы исполнительной власти, нечеткое когнитивное моделирование, аудит информационной безопасности, информационный портал.

M.Yu. Rytov, E.V. Leksikov, P.A. Kovalyov

FUZZY COGNITIVE MODELING APPLICATION FOR CARRYING OUT OF INFORMATION SAFETY AUDIT OF INFORMATION PORTALS OF REGIONAL EXACUTIVE AUTHORITIE

At the present moment the internal policy is formed under complicated conditions of foreign situation. The regional policy is formed on the basis of index leveling in socio-economic development. The support of vital functions in social and economic systems of regions plays a role of no small importance in the system of executive power authority (EPA) including regional one. In the interests of assurance of public administration realization it is necessary to have at the disposal a condition for the existence of the vital functions process in social and economic systems. The information portals which perform a role of information and management systems (IMS) have a significant element in the management of social and economic systems of a region. These systems allow performing online information gathering, storage, transfer, analysis and processing regarding a situation changing for decision making. The IMS development makes new requirements to the realization of the methodology of process management, taking into account situation changes. The analysis of information flows of regional EPA witnesses of that for management decision making only 10-15% of available information is used today.

Key words: automated management systems, regional executive authorities, fuzzy cognitive modeling, information safety audit, information portal.

Обеспечение региональных органов исполнительной власти (ОИВ) единой точкой доступа к информационным, производственным и экономическим ресурсам позволяет оптимизировать и автоматизировать процесс принятия управленческих решений. Однако внедрение информационного портала в такую обширную и сложную область не является мгновенным и легким процессом. Информационный портал (ИП) является неотъемлемой частью усовершенствования процесса принятия управленческих решений для органов государственной и исполнительной власти, призванной решать критические проблемы информационных процессов. Также следует отметить, что в настоящее время процесс разработки информационных порталов региональных органов исполнительной власти не типизирован и не позволяет оперативно создавать информационные порталы для различных регионов на основе типовых проектных решений с целью обмена и обработки данных.

Для региональных органов исполнительной власти необходимо, чтобы ин-

формационный портал выполнял роли АИС и ИСУ.

АИС (автоматизированная информационная система) – это система, предназначенная для хранения, поиска и обработки информации, и соответствующие организационные ресурсы.

ИСУ (информационная система управления) – это единый набор находящихся в отношениях и связях друг с другом элементов, позволяющий осуществлять сбор, обработку, хранение и предоставление информации о деятельности региональных ОИВ в целях принятия управленческих решений.

Разработка информационного портала региональных органов исполнительной власти является сложным процессом (рисунок). Перед разработкой информационного портала выполняются длительные и масштабные работы по сбору первичных требований, их анализу и проектированию будущего программного решения, оценке угроз и рисков. В целом весь этот длительный процесс называется аудитом информационной безопасности.

Условно первый этап процесса разработки ИП можно разделить на 4 уровня, которые выполняются строго последовательно:

1. Проведение аудита ИБ.

2. Подготовка ТЗ. Формируется техническое задание на разработку АИС (в обиходе «ТЗ по конкурсу»), в котором оформляются первичные требования различных направлений к АИС.

3. Выбор вида ИП. Выбирается основное техническое решение для поставленной в ТЗ задачи.

4. Выдача проекта и прогнозирование рисков. На выходе после первых трех уровней должен получиться технический проект по реализации заданной АИС.

Рассматривая процесс аудита ИБ организации, остановимся на первом уровне.

На первом уровне происходит осознание потребности в информационном портале, поиск первичной информации по запрашиваемой тематике. Формируются первичные требования к информационному порталу, а также перечень целей и задач, которые он должен будет выполнять.

Затем на основе первичных требований необходимо проводить аудит информационной безопасности (далее аудит ИБ). Аудит ИБ определен как аудит, охватывающий изучение и оценку по всем аспектам (или части из них) систем автоматизированной обработки информации, в том числе связанных неавтоматизированных процессов и интерфейса, который их собирает [1].

Аудит ИБ представляет собой деятельность по сбору и оценке ряда доказательств для определения того, является ли информационная система безопасной, поддерживает ли целостность переработанных и внесенных данных, позволяет ли достичь стратегических целей субъекта и насколько эффективно использует информационные ресурсы.

Активное развитие информационных технологий способствовало разработке и последующему совершенствованию методологий аудита при использовании компьютеров и комплектующих средств. Информационные технологии сегодня применимы на всех этапах проведения процедуры аудита: во время планирования, осуществления, документирования аудиторской работы, оформления аудиторского вывода. Поэтому вопрос автоматизации процесса аудита является очень важным на данный момент.

В настоящее время достаточно сложно представить аудиторское исследование без использования информационных технологий. С одной точки зрения, компьютер – это универсальное средство, призванное помогать аудиторам решать различные повседневные задачи, в круг которых входят: в информационном обслуживании - ускорение процессов получения и обработки информации из баз данных клиента, документальная обработка информации, полученной аудиторами в ходе проверки; в методическом обслуживании - разработка аналитических электронных таблиц, создание прикладных аудиторских программ, ускорение применения аудиторских процедур; редактирование текстов и электронных таблиц, создание баз данных и пр. Однако, с другой точки зрения, использование клиентом автоматизированных ин-

формационных систем предъявляет особые требования к организации проведения исследования и выбора аудиторских процедур, что усложняет данный процесс.

На современном этапе организациям необходим структурированный подход в области аудита и управления информационными технологиями, который позволит гарантировать безопасность. Анализ показывает, что существующие подходы к проведению аудита ИБ не учитывают взаимное влияние ИТ-процессов друг на друга, объясняемое наличием ограничений на общий потребляемый ресурс.

Система управления ИТ-процессами организации является сложным организационно-техническим объединением. Именно поэтому механизм управления ее элементами является слабоструктурированным, допускающим формализацию в основном на качественном уровне, где изменение параметров системы может приводить к труднопредсказуемым изменениям в ее структуре [3].

В связи с этим для решения задачи анализа информации, имеющей такого рода нечеткости, особую актуальность приобрели нечеткие модели, т.е. модели, опирающиеся на теорию нечетких множеств, представляющую собой обобщение и переосмысление важнейших направлений классической математики. Для формализации подобных сложных систем чаще всего используется метод нечеткого моделирования для слабоструктурированных систем, который базируется на понятии нечетких множеств.

В основе метода нечеткого моделирования лежит понятие нечеткой когнитивной карты (НКК), впервые предложенное Б. Коско.

Информация о системе или процессе представляется в виде набора значимых факторов (концептов) и связывающих их причинно-следственных связей, при этом узлы получаемого нечеткого ориентированного графа представляют собой нечеткие множества, а направленные ребра определяют степень влияния (вес) связываемых концептов, что, в отличие от других методов, дает возможность формализации численно неизмеримых факторов, использования неполной, нечеткой информации [2].

Общая процедура применения аппарата НКК к решению задачи оценки обеспеченности ИТ-стратегии на заданном интервале планирования предусматривает реализацию следующего конечного множества этапов, которые задаются стандартным способом построения НКК.

Этап 1. Ввод множеств концептов:

• Шаги 1-4. Формирование множеств концептов, которые характеризуют различные параметры.

Для моделирования НКК необходимо задать множества концептов, которые в дальнейшем определят структуру нечеткой когнитивной модели исследуемого процесса.

В данном случае рассматривается ИТ-аудит предприятия перед проектированием ИП. Берутся множества угроз, рисков, ИТ-целей, уровни возможностей ИТ-процессов, а также ключевые показатели эффективности ИТ-процессов [4].

Каждое множество концептов имеет следующий вид:

$$K^{У} = (K_1^{У}, K_2^{У}, \dots, K_i^{У}),$$

где $K_i^{У}$ - концепт, характеризующий уровень влияния угроз безопасности (i =1, …, I).

Таким способом задаются все остальные множества концептов.

• Шаг 5. Формирование когнитивной модели исследуемого процесса.

Результатом выполнения шагов 1–4 первого этапа является структура нечеткой когнитивной модели:

$$K = (\propto_1 K^{У}, \propto_2 K^{a}, \propto_3 K^{b}, K^{KPI}),$$

где $\propto_1$, $\propto_2$, $\propto_3$ - бинарные функции, определяющие перечень критичных бизнес-целей, ИТ-целей и ИТ-процессов для конкретного профиля организации; K^{a}, K^{b}, K^{KPI} – множества концептов, которые были заданы в шагах 2-4.

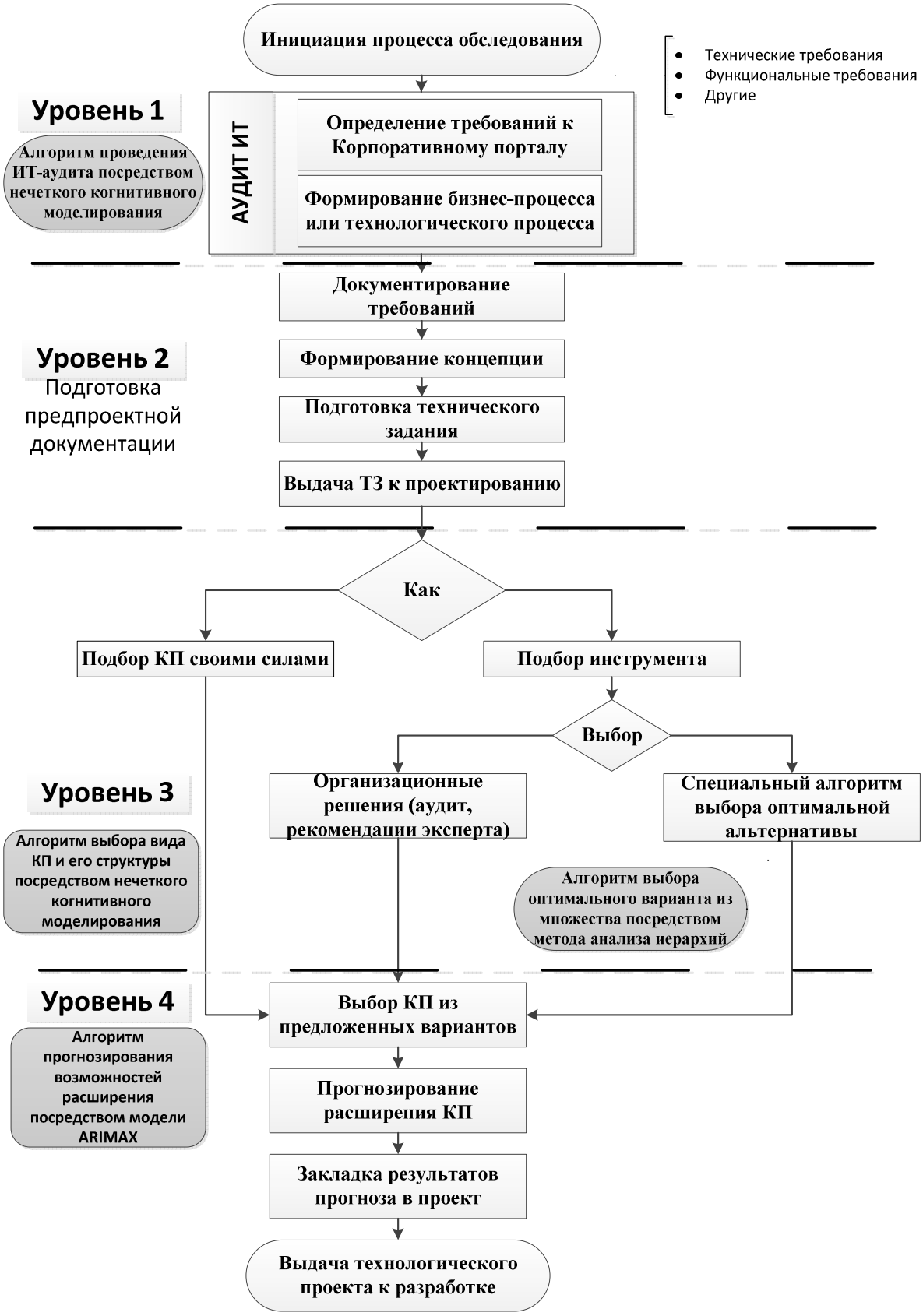


Рис. Алгоритм разработки информационного портала

Этап 2. Формирование отношений влияния между множествами:

• Шаги 1-4. Формирование отношений влияния между концептами из всех введенных на 1-м этапе множеств.

В качестве примера рассмотрим множество $K^У$. Отношения влияния между концептами из множества $K^У$ представляются в виде весов $w_{ij}^У \in [-1,1]$ и рассматриваются как элементы нечеткой матрицы смежности $W^{ВЦ}$:

$$W^{ПР} = \begin{bmatrix} W_{11}^У & W_{12}^У & \dots & W_{1i}^У \\ W_{21}^У & W_{22}^У & \dots & W_{2i}^У \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{j1}^У & W_{j1}^У & \dots & W_{ji}^У \end{bmatrix}$$

Эти отношения, отображаемые в виде дуг ориентированного графа, описывающего нечеткие причинно-следственные связи между концептами, могут быть положительными, отрицательными или нейтральными, характеризующими соответствующее влияние концептов друг на друга.

• Шаг 5. Для определения взаимовлияния концептов от исходной нечеткой матрицы смежности W с положительно-отрицательными нечеткими связями нужно перейти к нечеткой матрице положительных связей V размером $2I \times 2I$, элементы которой определяются из матрицы W размером $I \times I$ с помощью следующей замены:

- если $w_{ij} > 0$, то $v_{2i-1,2j-1} = w_{ij}, v_{2i,2j} = w_{ij}$;
- если $w_{ij} < 0$, то $v_{2i-1,2j-1} = -w_{ij}, v_{2i,2j} = -w_{ij}$.

Остальные элементы принимают нулевые значения.

В случае амбивалентности в исходной матрице положительно-отрицательная пара весов влияния преобразуется по аналогичному алгоритму, только вместо нулей на диагоналях ставятся определенные значения.

• Шаг 6. Согласованные отношения взаимовлияния концептов определяются в результате транзитивного замыкания:

$$V = V \upsilon V^2 \upsilon \dots V^n,$$

где степени нечетких матриц вычисляются на основе операции max–T-композиции.

После этого результат представляется в виде модифицированной матрицы, состоящей из положительно-отрицательных пар весов W= $\|w_{i,j}, \overline{w}_{ij}\|$, полученных по следующему правилу:

$$\begin{cases} w_{ij} = \max(v_{2i-1,2j-1}, v_{2i,2j}); \\ \overline{w}_{ij} = -max(v_{2i-1,2j-1}, v_{2i,2j}). \end{cases}$$

В результате этапа 2 формируется нечеткая когнитивная карта, отображающая системные факторы анализируемой системы (процесса, проблемы).

Этап 3. Формирование нечетких моделей. Модели формируются исходя из влияния одного концепта на другой. Например, в случае аудита ИБ можно построить НКМ влияния угроз, рисков на ИТ-процессы и БЦ региональных ОИВ.

В итоге получаются нечеткие когнитивные модели, отражающие все ключевые параметры, а также влияние каждого параметра на остальные. Таким образом, можно получить полную картину и взвесить все плюсы и минусы при планировании разработки программного решения.

Для региональных ОИВ, планирующих внедрение информационного портала, данный метод проведения аудита ИБ может сыграть немаловажную роль, так как позволяет установить зависимость между предполагаемыми угрозами, рисками и бизнесцелями, ИТ-возможностями информационного портала, определив эффективность использования такого мобильного инструмента централизованного управления практически всеми организационными и информационно-технологическими процессами ОИВ, и оценить риски при принятии управленческих решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еременко, С.В.Теоретические основы управления обменом данными в средекорпоративного портала промышленного предприятия / С.В.Еременко, М.Ю. Рытов, К.В. Мегаев. - Брянск: БГТУ, 2014.
2. Рытов, М.Ю. Анализ проблем обмена данными в сетях промышленных предприятий с корпоративными порталами/ М.Ю. Рытов, П.А. Ковалев // Вестник Брянского государственного технического университета.- 2015.- № 1 (45). - С. 95-100.
3. Обзор стандарта COBIT (Control Objectives for Information and related Technology). V. 4.1. Методология, процессы, критерии, внедрение Cobit//IT-Expert.–2012.–Режим доступа: http://www.itexpert.ru/rus/biblio/cobit/.
4. Мониторинг рисков на основе нечетких когнитивных моделей // Программные продукты и системы. – 2007. –Режим доступа: http://www.swsys.ru/index.php?id=399&page=article.

1. Yeryomenko, S.V. Theoretical Fundamentals of Data Communication Control in Corporate Portal Environment of Enterprise / S.V. Yeryomenko, M.Yu. Rytov, K.V. Megaev. - Bryansk: BSTU, 2014.
2. Rytov, M.Yu. Analysis of data communication problems in networks of enterprises with corporate portals/ M.Yu. Rytov, P.A. Kovalyov // Bulletin of Bryansk State Technical University.- 2015.- № 1 (45). – pp. 95-100.
3. Review of Standard of COBIT (Control Objectives for Information and related Technology). V. 4.1. Methodology, Processes, Criteria, Introduction Cobit//IT-Expert.–2012.– Access Mode: http://www.itexpert.ru/rus/biblio/cobit/.
4. Risk monitoring based on fuzzy cognitive models // Software Products and Systems. – 2007. – Access Mode: http://www.swsys.ru/index.php?id=399&page=article.

Статья поступила в редколлегию 8.04.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Лозбинев Ф.Ю.

Сведения об авторах:

Рытов Михаил Юрьевич, к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета, e-mail: rmy@tu-bryansk.ru.
Лексиков Евгений Вячеславович, ассистент Брянского государственного технического университета, e-mail: JL32@yandex.ru.
Ковалев Павел Алексеевич, аспирант Брянского государственного технического университета, e-mail: rmy@tu-bryansk.ru.

Rytov Mikhail Yurievich, Can.Eng., Assistant Prof. Bryansk State Technical University, e-mail: rmy@tu-bryansk.ru.
Leksikov Eugene Vyacheslavovich, Assistant Bryansk State Technical University, e-mail: JL32@yandex.ru.
Kovalyov Pavel Alekseyevich, Post graduate student Bryansk State Technical University, e-mail: rmy@tu-bryansk.ru.

УДК 519.876.5:658.5
DOI: 10.12737/20291

А.И. Якимов, Е.А. Якимов, В.И. Аверченков, Н.Н. Ивкина

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ПОСТРОЕНИЕМ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Рассмотрена задача многокритериального управления технологическим процессом (ТП) построения имитационной модели с использованием принципа оптимальности Беллмана. Обоснованность оптимального решения показана для одно- и двухмерных характеристик потока на дугах ориентированного ациклического графа ТП. Представлен пример решения оптимизационной задачи с использованием ресурсов f- и p-типа в корпоративной информационной системе.

Ключевые слова: имитационная модель, многокритериальное управление, принцип оптимальности Беллмана, технологический процесс, корпоративная информационная система.

A.I. Yakimov, E.A. Yakimov, V.I. Averchenkov, N.N. Ivkina

OPTIMIZATION PROBLEM OF CONTROL BY SIMULATION MODEL FORMATION IN CORPORATE INFORMATION SYSTEM

The use of the wide spectrum of information technologies in corporate information systems allows offering the iteration method for a distributed formation of simulation models. In accordance with this method at each stage of designing the commercial software tools with certain functionality are used.

The considered technological process (TP) of simulation model formation (software toll creation) is a controlled system being at one of the states variable at each stage of a technological process as a result of a control action (control). At the same time the efficiency of a control process is characterized by a multidimensional purposeful function (PF) subject to a system state and control used.

In the investigation presented the problem of multicriterion control of a technological process of simulation model formation in accordance with Bellman's principle of optimality. The justification of an optimum solution is shown for the unidimensional or two-dimensional characteristics of a flow on arches of an oriented acyclic graph of a technological process. The presented example of the solution of the optimization problem with the use of resources of *f* – and *p*-type in a corporate information system shows the necessity of priority criterion definition for the final choice of a route on a graph with technological modes, that is, an optimum variant of resource distribution.

Key words: simulation model, multicriterion control, Bellman's principle of optimality, technological process, corporate information system.

Введение

Использование широкого спектра информационных технологий в корпоративных информационных системах позволяет предложить итерационный метод распределенного построения имитационных моделей [1]. В соответствии с этим методом на каждом этапе проектирования применяют коммерческие программные средства с определенной функциональностью. Например, для этапа статистического анализа данных могут быть использованы следующие коммерческие программные продукты: MS Excel с макросом-дополнением XLSTAT-Pro (http://www.xlstat.com/); STADIA с необходимыми статистическими функциями (http://www.protein.bio.msu.su/~akula/index.htm); SPSS (Statistical Package for Social Science) – профессиональный статистический программный пакет (http://www.spss.com/); STATA – (http://www.stata.com/); STATISTICA – пакет программ фирмы StatSoft Inc. (http://www.statsoft.com/); JMR для анализа данных (http://www.jmp.com/); SYSTAT – статистическая система для персональных компьютеров (http://systat.com/); NCSS – программа, рассчитанная на непрофессионалов в области статистической обработки (http://www.ncss.com/); MINITAB 14 – про-

граммный пакет с возможностью визуализации результатов работы (http://www.minitab.com/); STATGRAPHICS PLUS – статистическая программа, содержащая более 250 статистических функций (http://www.statgraphics.com/); PRISM с основными применяемыми статистическими функциями (http://www.graphpad.com/) [2]. Необходимая программа выбирается в соответствии с реализуемым оператором F_i на i-м этапе.

В последовательности операторов F_i будем рассматривать два типа ресурсов – человеческий (ресурс f-типа) и программный (ресурс p-типа), используемый на этапах построения имитационной модели (создания программного средства). В связи с неоднозначностью выбора таких ресурсов ставится оптимизационная задача [3].

Постановка задачи

Пусть технологический процесс (ТП) проектирования, разработки и эксплуатации имитационной модели (программного средства) *TexPr* состоит из n фиксированных этапов:

$$TexPr \overset{def}{\equiv} \{ St_i \mid i = 1, ..., n \}. \qquad (1)$$

Этапы St_i, $i=1,\ldots,n$, выполняются последовательно.

Пусть каждый из этапов St_i предполагает выбор одного из допустимых технологических режимов (ТР) $FP_{R(i,k)}$, определяемых использованием человеческого ресурса (ресурса f-типа) и одного из видов допустимого программного обеспечения (ресурса p-типа) на i-м этапе (рис. 1):

$$St_i \overset{def}{\equiv} \{ FP_{R(i,k)} \mid k = 1, ..., |V_i| \}, \quad i = 1, ..., n, \qquad (2)$$

$$R(i,k) \overset{def}{\equiv} (i, \mathrm{f}_{ik}, \mathrm{p}_{ik}, k).$$

Здесь $R(i,k)$ – вектор-идентификатор номера технологического режима, включающий порядковый номер этапа St_i i, $i \in \{1,\ldots,n\}$; код используемого ресурса f-типа f_{ik}, $f_{ik} \in \{1,\ldots,|f|\}$; порядковый номер используемого ресурса p-типа p_{ik}, $p_{ik} \in \{1,\ldots,|p|\}$; порядковый номер ТР в пределах нумерации режимов этапа St_i k, $k \in \{1,\ldots,|V_i|\}$, где $|V_i|$ – мощность множества номеров технологических режимов на i-м этапе ТП.

Себестоимости отдельных ТР складываются из стоимостей используемых ресурсов. Время, затрачиваемое на обработку информации в отдельных ТР, зависит, в частности, от знаний, умений, навыков (квалификации) человеческого ресурса (ресурса f-типа) и функциональных возможностей программных средств (ресурса p-типа) [2].

Пусть *Res*, *Cost* – множества ресурсов f-, p-типа и стоимостей соответствующих ресурсов:

$$Res \overset{def}{\equiv} \{ Res_r \mid r = 1, ..., |Res| \},$$

$$Cost \overset{def}{\equiv} \{ Cost_r \mid Cost_r \in R, \quad r = 1, ..., |Res| \}.$$

Технологический процесс (1) может быть представлен в виде нагруженного ориентированного ациклического графа [4], вершинами которого являются ТР (2). Для интерпретации в виде графа ТП (1) разделяется на n этапов. Исток графа представляет собой нулевой этап ТП (1). Нумерация вершин выполняется последовательно от истока (0 этап) к стоку ($n+1$ этап). Вершины соединяются дугами в соответствии с последовательностью этапов (рис. 1).

Обозначим через τ_{uv} нагрузку на дугу графа (рис. 2), исходящую из вершины с номером $u \in V_{i-1}$ и входящую в вершину с номером $v \in V_i$, где V_i – множество номеров вершин для i-го этапа ТП (1):

$$V_i \overset{def}{\equiv} \left\{ \sum_{j=0}^{i-1} |V_j| + 1,\ \sum_{j=0}^{i-1} |V_j| + 2,\ \ldots,\ \sum_{j=0}^{i} |V_j| \right\},\ i = 1, \ldots, n\ . \qquad (3)$$

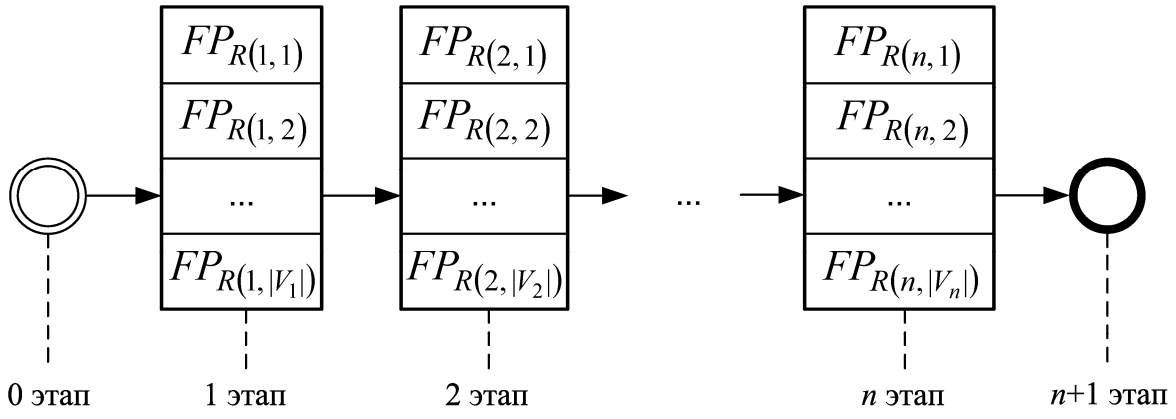


Рис. 1. Последовательность технологических этапов проектирования, разработки и эксплуатации имитационной модели

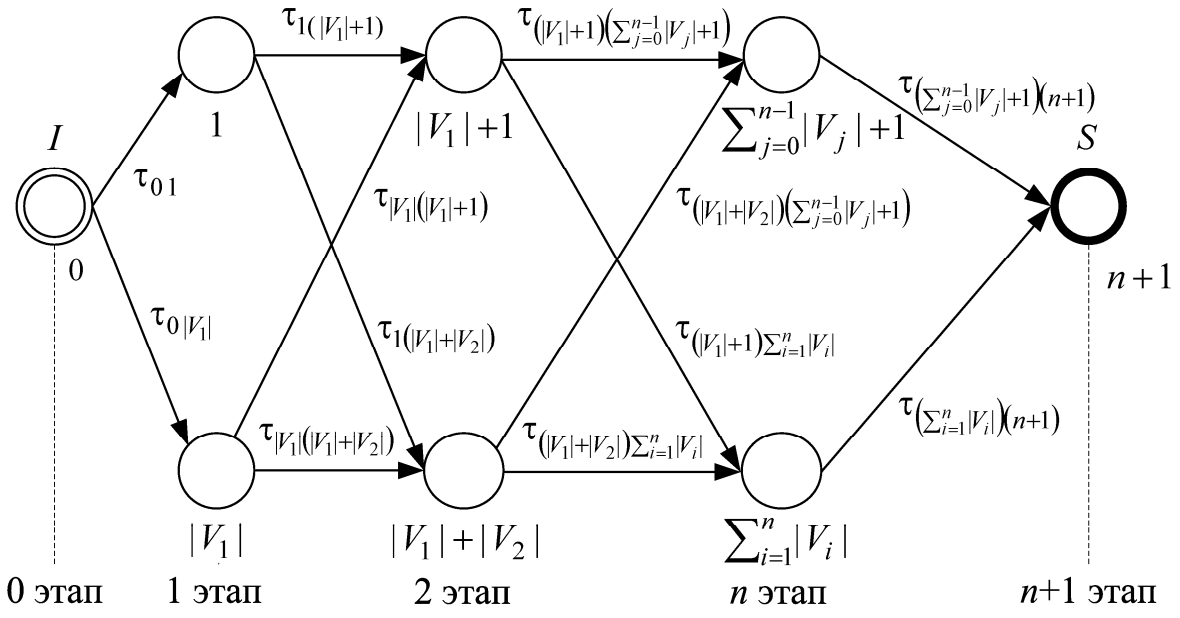


Рис. 2. Нагрузки на дуги ориентированного графа

Пусть нагрузки τ_{uv} интерпретируются как временные затраты и/или стоимости затрат ресурсов на обработку информации при решении одной имитационной задачи в соответствии с ТР (2) и ТП (1).

Решение задачи многокритериального управления построением имитационной модели

В общем случае одним из возможных методов решения задачи определения оптимальных ТР (2) для ТП (1) является метод динамического программирования – метод нахождения последовательных оптимальных решений в задачах с многошаговой (многоэтапной) структурой [5-8].

Рассматриваемый технологический процесс построения имитационной модели (создания программного средства) является управляемой системой, находящейся в одном из нескольких состояний, изменяемых на каждом этапе ТП в результате управляющего воздействия (управления). При этом

эффективность процесса управления характеризуется многомерной целевой функцией (ЦФ), зависящей от состояния системы и применяемого управления.

Пусть в начальный момент времени (0 этап ТП (1)) система находится в исходном состоянии τ_0 (рис. 3). На следующем шаге в результате управления y_1 система из состояния τ_0 переходит в состояние $\tau_1=g_1(\tau_0, y_1)$ (переход с 0 этапа ТП (1) на 1 этап). При этом достигается эффект $h_1(\tau_0, y_1)$.

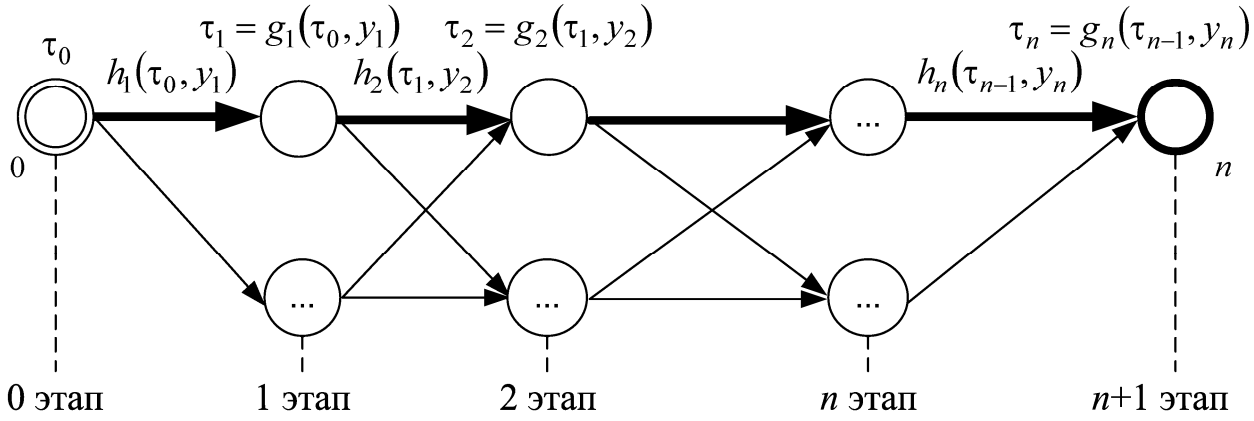


Рис. 3. Последовательность состояний и управлений

Далее управление y_2 переводит систему из состояния τ_1 в состояние $\tau_2=g_2(\tau_1, y_2)$ и достигается эффект $h_2(\tau_1, y_2)$.

Принцип оптимальности Беллмана утверждает, что на последовательности оптимальных управлений y_1^*, y_2^*,…, y_i^*, $i=1,\ldots,n$, должна достигать max(min) каждая из функций

$$J_i(\tau_{i-1}, y_i, y_{i+1}, \ldots, y_n) = h_i(\tau_{i-1}, y_i) + h_{i+1}(\tau_i, y_{i+1}) + \ldots + h_n(\tau_{n-1}, y_n), \quad i = 1, \ldots, n. \tag{4}$$

Введем следующее обозначение:

$$\varphi_i(\tau_{i-1}) \overset{\text{def}}{\equiv} \max_{y_i, y_{i+1}, \ldots, y_n}(\min)\left(J_i(\tau_{i-1}, y_i, y_{i+1}, \ldots, y_n)\right), \quad i = 1, \ldots, n. \tag{5}$$

Тогда из (4) и (5) могут быть получены уравнения, называемые функциональными уравнениями Беллмана [7]:

$$\varphi_i(\tau_{i-1}) = \max_{y_i}(\min)\left(\varphi_{i+1}(g_i(\tau_{i-1}, y_i)) + h_i(\tau_{i-1}, y_i)\right), \quad i = 1, \ldots, n. \tag{6}$$

Решение уравнений Беллмана позволяет найти последовательность оптимальных управлений и оптимальных значений ЦФ.

С учетом обозначений нагрузок на дуги графа τ_{uv} функциональное уравнение (6) принимает вид

$$\tau_v = \min\left(\max_u\right)\{\tau_u + \tau_{uv}\}, \tau_0 = 0, \tag{7}$$

где $u \in V_{i-1}$ – номера вершин, из которых исходят дуги графа $(i-1)$-го этапа ТП; $v \in V_i$ – номера вершин, в которые входят дуги графа i-го этапа ТП; V_i – множество номеров вершин вида (3) для i-го этапа ТП.

Нагруженные дуги, исходящие из одних и тех же вершин, эквивалентны ввиду интерпретации их характеристик – временных и/или стоимостных затрат для одного и того же ТП (1) построения имитационной модели (создания программного средства), поэтому справедливы следующие соотношения:

Соотношение 1. Пусть $\tau_{uv} \in R$. Тогда для ТП (1) верны равенства вида [5]

$$\forall u \in V_{i-1} \forall v_1 v_2 \in V_i [\tau_{uv_1} = \tau_{uv_2}],\ i = 1,\ldots, n\,. \qquad (8)$$

Соотношение 2. Пусть $\tau_{uv} = (\tau_{uv}^{(1)}, \tau_{uv}^{(2)}) \in R^2$, $\tau_{uv_1} = (\tau_{uv_1}^{(1)}, \tau_{uv_1}^{(2)})$, $\tau_{uv_2} = (\tau_{uv_2}^{(1)}, \tau_{uv_2}^{(2)})$. Тогда для ТП (1) верны равенства вида

$$\forall u \in V_{i-1} \forall v_1 v_2 \in V_i [(\tau_{uv_1}^{(1)} = \tau_{uv_2}^{(1)}) \wedge (\tau_{uv_1}^{(2)} = \tau_{uv_2}^{(2)}) \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow (\tau_{uv_1} = \tau_{uv_2})],\ i = 1,\ldots, n\,. \qquad (9)$$

Утверждение 1. Пусть для $\tau_{uv} \in R$ справедливы соотношения вида (8). Тогда для рассматриваемой задачи функциональное уравнение Беллмана (7) принимает вид

$$\tau_v = L_i = L_{i-1} + \min_{u \in V_{i-1}} \left(\max\right)\{\tau_{uv}\},$$

где L_i – оптимальное состояние на i-м этапе, $L_i \in R$, $L_0 = \tau_0 = 0$, $u \overset{(5)}{\in} V_{i-1}$, $v \overset{(5)}{\in} V_i$, $i = 1, \ldots, n$.

Доказательство проводится методом математической индукции.

Утверждение 2. Пусть для $\tau_{uv} = (\tau_{uv}^{(1)}, \tau_{uv}^{(2)}) \in R^2$ справедливы соотношения вида (9). Тогда для рассматриваемой задачи из уравнения Беллмана (7) следует [5]

$$L_i = \begin{cases} \left(\begin{array}{l} L_{(i-1)1} + \underset{u \in V_{i-1}}{Fm_1}\{\tau_{uv}^{(1)}\} \\ L_{(i-1)2} + Fm_2 \left\{ \tau_{u_i v}^{(2)} \middle| \tau_{u_i v}^{(1)} = \underset{u \in V_{i-1}}{Fm_1}\left(\{\tau_{uv}^{(1)}\}\right) \right\} \end{array} \right) \Bigg| \ pOpt = 1, 2; \\ \left(\begin{array}{l} L_{(i-1)1} + Fm_1 \left\{ \tau_{u_i v}^{(1)} \middle| \tau_{u_i v}^{(2)} = \underset{u \in V_{i-1}}{Fm_2}\left(\{\tau_{uv}^{(2)}\}\right) \right\} \\ L_{(i-1)2} + \underset{u \in V_{i-1}}{Fm_2}\{\tau_{uv}^{(2)}\} \end{array} \right) \Bigg| \ pOpt = 2, 1, \end{cases}$$

где $L_i = (L_{i1}\ \ L_{i2})^T$, $L_0 = (0\ \ 0)^T$, $u \in V_{i-1}$, $v \in V_i$, $i = 1,\ldots,n$; $pOpt$ – параметр наивысшего приоритета критериев оптимизации ТП (1) по 1-му (времени) либо 2-му (стоимости ресурсов) измерениям векторов $\tau_{uv} \in R^2$; $Fm_1, Fm_2 \in \{min, max\}$ – лексикографически упорядоченные параметром $pOpt$ критерии оптимизации ТП по 1-му и 2-му измерениям векторов состояний на этапах ТП соответственно.

Замечание. Доказательство утверждения 2 проводится с использованием метода математической индукции с учетом значений измерений векторов $\tau_{uv}^{(pOpt)} \in R$. При этом оптимизация ТП (1) методом динамического программирования (в указанной многокритериальной задаче выбора предпочтительных ТР рассматриваемого ТП) в первую очередь проводится по наиболее важному критерию (измерению $pOpt$ векторов $\tau_{uv}^{(pOpt)} \in R$). В случае совпадения оптимальных по наиболее важному критерию значений для нескольких ТР рассматриваемого оптимизируемого этапа ТП проводится оптимизация по другому, менее значимому из измерений векторов $\tau_{uv}^{(pOpt)} \in R$, по которому и выбираются предпочтительные ТР (2) ТП (1).

Выбор последовательности оптимальных управлений (оптимальных ТР для ТП либо оптимального маршрута по графу) определяется последовательностью предикатов вида

$$Fl \overset{def}{\equiv} \left\{ fl_{ij} \ \middle| \ fl_{ij} \in \{True\ , False\ \},\ i = 1, \ldots, n,\ j = 1, \ldots, |V_i| \right\}. \qquad (10)$$

Пример оптимизационной задачи управления построением имитационной модели

Рассматривается выбранный для исследования ТП построения имитационной модели для системы управления [6] производственно-экономической деятельностью промышленного предприятия (рис. 4).

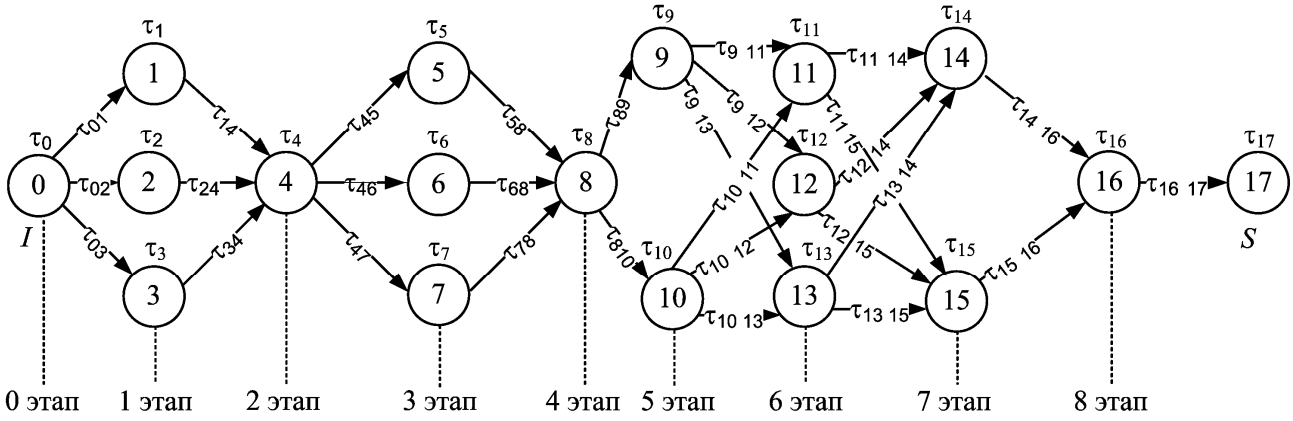


Рис. 4. Ориентированный граф с технологическими режимами

Пусть процесс *TexPr* (1) построения имитационной модели (изготовления программного средства) состоит из n=8 технологических этапов St_i, i=1,…,8: St_1 – вербальное моделирование; St_2 – концептуальное моделирование; St_3 – разработка формальной модели; St_4 – программирование; St_5 – верификация; St_6 – проведение имитационных экспериментов; St_7 – обработка статистики имитации; St_8 – выбор решения.

При этом на каждом из этапов допускается выбор одного из следующего количества допустимых технологических режимов: 1 этап – $|V_1|$=3; 2 этап –$|V_2|$=1; 3 этап – $|V_3|$=3; 4 этап – $|V_4|$=1; 5 этап – $|V_5|$=2; 6 этап – $|V_6|$=3; 7 этап – $|V_7|$=1; 8 этап – $|V_8|$=1. Технологические режимы на каждом этапе определены человеческим ресурсом, т.е. используемыми специалистами, и выбранным программным обеспечением:

$FP_1 =< f_{11}, BPwin >$,

$FP_2 =< f_{11}, Rational\ Rose >$,

$FP_3 =< f_{11}, Power\ Designer >$,

$FP_4 =< f_{21}, BPwin >$,

$FP_5 =< f_{31}, Enterprise\ Architect >$,

$FP_6 =< f_{32}, Enterprise\ Architect >$,

$FP_7 =< f_{33}, Enterprise\ Architect >, Studio >$,

$FP_9 =< f_{51}, MS\ Visual\ Studio >$,

$FP_{10} =< f_{52}, MS\ Visual\ Studio >$,

$FP_{11} =< f_{61}, MS\ Visual\ Studio >$,

$FP_{12} =< f_{62}, MS\ Visual\ Studio >$,

$FP_{13} =< f_{63}, MS\ Visual\ Studio >$,

$FP_{14} =< f_{71}, Statistica >$,

$FP_{15} =< f_{71}, SPSS >$,

$FP_{16} =< f_{81}, MS\ Excel\ Solver >$.

Пусть определены временные затраты для каждого из ТР ТП. Время T_i (ч), i=1,…,8, необходимое для обработки информации при решении одной имитационной задачи на этапах ТП (1): 1 этап – T_1 = 5,2; 7,8; 10,3; 2 этап – T_2 = 6,0; 3 этап – T_3 = 6,4; 6,4; 6,4; 4 этап – T_4 = 8,7; 5 этап – T_5 = 10,7; 10,1; 6 этап – T_6 = 8,6; 8,6; 4,3; 7 этап – T_7 = 15,0; 19,0; 8 этап – T_8 = 12,8.

Пусть определены (известны и достоверны) стоимости ресурсов S_i (руб.), i=1,…,8, для обработки информации при решении одной задачи на соответствующих стадиях ТП: 1 этап – S_1 = 1499,0; 1543,0; 1485,0; 2 этап – S_2 = 5934,0; 3 этап – S_3 = 9877,0; 9598,0; 9429,0; 4 этап – S_4 = 2431,0; 5 этап – S_5 = 5577,0; 5220,0; 6 этап – S_6 = 8584,0; 8544,0; 2287,0; 7 этап – S_7 = 16539,0; 15475; 8 этап – S_8 = 130,0.

Соответственно с учетом $T_i=(t_{i1},\ldots,t_{i|Vi|})$, $S_i=(s_{i1},\ldots,s_{i|Vi|})$, i=1,…,8, нагрузки на дуги графа $\tau_{ij} \in R^2$ принимают значения: $\tau_{01} = \tau_{02} = \tau_{03} = (0,0)$; $\tau_{14} = (t_{11}, s_{11})$,

$\tau_{24} = (t_{12}, s_{12})$, $\tau_{34} = (t_{13}, s_{13})$; $\tau_{45} = \tau_{46} = \tau_{47} = (t_{21}, s_{21})$; $\tau_{58} = (t_{31}, s_{31})$, $\tau_{68} = (t_{32}, s_{32})$, $\tau_{78} = (t_{33}, s_{33})$; $\tau_{89} = \tau_{8\ 10} = (t_{41}, s_{41})$; $\tau_{9\ 11} = \tau_{9\ 12} = \tau_{9\ 13} = (t_{51}, s_{51})$, $\tau_{10\ 11} = \tau_{10\ 12} = \tau_{10\ 13} = (t_{52}, s_{52})$; $\tau_{11\ 14} = \tau_{11\ 15} = (t_{61}, s_{61})$, $\tau_{12\ 14} = \tau_{12\ 15} = (t_{62}, s_{62})$, $\tau_{13\ 14} = (t_{63}, s_{63})$; $\tau_{14\ 16} = (t_{71}, s_{71})$, $\tau_{15\ 16} = (t_{72}, s_{72})$, $\tau_{16\ 17} = (t_{81}, s_{81})$.

Оптимальные ТР ТП (1) определяются согласно принципу поэтапной оптимизации Беллмана с использованием построенных функций вида (10). При этом строится последовательность двухмерных векторов вида

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{(22)} \begin{pmatrix} L_1[1] \\ L_1[2] \end{pmatrix} \xrightarrow{(22)} \begin{pmatrix} L_2[1] \\ L_2[2] \end{pmatrix} \xrightarrow{(22)} \ldots \xrightarrow{(22)} \begin{pmatrix} L_8[1] \\ L_8[2] \end{pmatrix},$$

где L_8[1], L_8[2] – итоговое оптимальное время выполнения этапов ТП и стоимость расхода ресурсов соответственно.

Оптимальный маршрут по графу представляет собой последовательность предикатов (10) следующего вида:

$$\begin{pmatrix} fl_{11} \\ fl_{12} \\ fl_{13} \end{pmatrix} \to (fl_{21}) \to \begin{pmatrix} fl_{31} \\ fl_{32} \\ fl_{33} \end{pmatrix} \to (fl_{41}) \to \begin{pmatrix} fl_{51} \\ fl_{52} \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} fl_{61} \\ fl_{62} \\ fl_{63} \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} fl_{71} \\ fl_{72} \end{pmatrix} \to (fl_{81}).$$

В результате решения оптимизационной задачи с заданными исходными данными получены следующие оптимальные ТР выбранного ТП:

1) с минимальными временными затратами и минимальными затратами ресурсов (*pOpt=1* – оптимизация в первую очередь по времени (1-я координата), во вторую – по стоимости ресурсов; Fm_1, $Fm_2=min$): L_{min}^* = L_8 = (68,5; 43469,0), где время составило 68,5 ч, стоимость ресурсов – 43469 руб.; маршрут по графу – < 0 – 1 – 4 – 7 – 8 – 10 – 13 – 14 – 16 – 17 >;

2) с минимальной суммарной стоимостью затрат ресурсов и времени (*pOpt=2* – оптимизация в первую очередь по стоимости ресурсов (2-я координата), во вторую – по времени; Fm_1, $Fm_2=min$): L_{min}^* = L_8 = (77,6; 42391), где время составило 77,6 ч, стоимость ресурсов – 42391 руб.; маршрут по графу – < 0 – 3 – 4 – 7 – 8 – 10 – 13 – 15 – 16 – 17 >.

Общий программный комплекс, обеспечивающий решение рассматриваемых задач, описан в работе [8].

Заключение

В представленном исследовании решена задача многокритериального управления технологическим процессом построения имитационной модели в соответствии с принципом оптимальности Беллмана. Обоснованность оптимального решения показана для одно- и двухмерных характеристик потока на дугах ориентированного ациклического графа ТП. Представленный пример решения оптимизационной задачи с использованием ресурсов *f*- и *p*-типа в корпоративной информационной системе показывает необходимость определения приоритетного критерия для окончательного выбора маршрута по графу с технологическими режимами, т. е. оптимального варианта распределения ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверченков, В.И. Метод распределенного построения имитационной модели производственной деятельности промышленного предприятия / В.И. Аверченков, А.И. Якимов, О.М. Демиденко, Н.Н. Ивкина // Южно-Сибирский научный вестник. – 2015. – № 4(12). – С. 22–28.
2. Якимов, А.И. Информационная оценка программных средств для управления экономической деятельностью промышленного предприятия на основе имитационной модели / А.И. Якимов, К.В. Захарченков // Вестник Брянского

государственного технического университета. – 2014. – № 1(41). – С. 94–101.
3. Шафер, Д.Ф. Управление программными проектами : достижение оптимального качества при минимуме затрат : [пер. с англ.] / Д.Ф. Шафер, Р.Т. Фатрелл, Л.И. Шафер. – М.: Вильямс, 2003. – 1136 с.
4. Новиков, Ф.А. Дискретная математика для программистов : учебник / Ф.А. Новиков. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 368 с.
5. Аверченков, В.И. Многокритериальное управление технологическим процессом с использованием принципа оптимальности Беллмана / В.И. Аверченков, А.И. Якимов, Е.М. Борчик // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – Т. 22. – № 25(152). – С. 95–101.
6. Якимов, А.И. Технология имитационного моделирования систем управления промышленных предприятий: монография / А.И. Якимов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 304 с.
7. Беллман, Р.Э. Динамическое программирование и уравнения в частных производных / Р.Э. Беллман, Э. Энджел. – М.: Мир, 1974. – 420 с.
8. Аверченков, В.И. Концепция оценки эффективности процессов управления в корпоративных информационных системах предприятий / В.И. Аверченков, С.К. Крутолевич, А.И. Якимов, К.В. Захарченков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – №1 (49). – С. 113-119.

1. Averchenkov, V.I. Method for simulation model distributed formation of enterprise production activity / V.I. Averchenkov, A.I. Yakimov, O.M. Demidenko, N.N. Ivkina // South-Siberian Scientific Bulletin. – 2015. – № 4(12). – pp. 22–28.
2. Yakimov, A.I. Information estimate of software tools for enterprise economic activity control based on simulation model / A.I. Yakimov, K.V. Zakharchenkov // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2014. – № 1(41). – pp. 94–101.
3. Shafer, D.F. Program Project Management: Achievement of Optimum Quality at Minimum Costs: [transl. from Engl.] / D.F. Shafer, R.T. Fatrell, L.I. Shafer. – M.: Williams, 2003. – pp. 1136.
4. Novikov, F.A. Discrete Mathematics for Programmers: Textbook / F.A. Novikov. – 2-d Edition. – S-Pb.: Peter, 2007. – pp. 368.
5. Averchenkov, V.I. Mulicriterion control of technological process using Bellman's Principle of optimality / V.I. Averchenkov, A.I. Yakimov, E.M. Borchik // Proceedings of Volgograd State Technical University. – 2014. – Vol. 22. – № 25(152). – pp. 95–101.
6. Yakimov, A.I. Simulation Techniques of Enterprise Control Systems: Monograph / A.I. Yakimov. – Mogilyov: Belorus.-Russian University, 2010. – pp. 304.
7. Bellman, R.E. Dynamic Programming and Partial Derivative Equations / R.E. Bellman, E. Engel. – M.: World, 1974. – pp. 420.
8. Averchenkov, V.I. Concept of control efficiency estimate in corporate information systems of enterprises / V.I. Averchenkov, S.K. Krutolevich, A.I. Yakimov, K.V. Zakharchenkov // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2016. – №1 (49). – pp. 113-119.

Статья поступила в редколлегию 28.04.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Спасенников В.В.

Сведения об авторах:

Аверченков Владимир Иванович, д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета, e-mail:aver@tu-bryansk.ru.
Якимов Анатолий Иванович, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированные системы управления» Белорусско-Российского университета, тел.: +375 (222) 252447, +375 (44) 7163816, e-mail: ykm@tut.by.
Якимов Евгений Анатольевич, к.т.н., ст. преподаватель кафедры «Автоматизированные системы управления» Белорусско-Российского университета, e-mail: e-soft@bk.ru.
Ивкина Наталия Николаевна, аспирант Брянского государственного технического университета, e-mail: kts@tu-bryansk.ru.

Averchenkov Vladimir Ivanovich, D.Eng., Prof. of Bryansk State Technical University, e-mail:aver@tu-bryansk.ru.
Yakimov Anatoly Ivanovich, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. "доцент кафедры «Automated Management Systems" Belarussian-Russian University, Phone: +375 (222) 252447, +375 (44) 7163816, e-mail: ykm@tut.by.
Yakimov Eugene Anatolievich, Can.Eng., Senior lecturer of the Dep."Automated Management Systems" Belorussian-Russian University, e-mail: e-soft@bk.ru.
Ivkina Nataliya Nikolayevna, Post graduate student Bryansk State Technical University, e-mail: kts@tu-bryansk.ru.

УДК 62-529
DOI: 10.12737/20292

М.Г. Шалыгин, А.Л. Сафонов

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ DAQ-ТЕХНОЛОГИЙ

Предложен способ автоматизации испытательных машин трения. Разработан алгоритм работы системы автоматизированных исследований при испытаниях на износ. Приведены средства автоматизации испытаний на трение и износ при возвратно-поступательном движении.

Ключевые слова: трение, автоматизация, триботехнические испытания, износ, DAQ-технологии.

M.G. Shalygin, A.L. Safonov

TRIBOTECHNICAL TEST AUTOMATION USING DAQ-TECHNIQUES

In the paper there is considered the automation of machines for tribotechnical tests. A method for the automation of testing machines of friction based on the use of DAQ-techniques is offered. A kinematics and a functional scheme of a testing machine of friction are shown. The means for the automation of friction and wear tests at a reciprocal motion including precision sensors are shown. A method for the definition of combined wear in a sample and counter-body is presented. The scheme of the automation of a loading device with automatic additional loading of a sample up to the value specified by an operator is offered. A scheme for an automatic breakdown of tests at system over-heating is shown. The algorithm for the operation of an automated system of investigations at wear tests is developed. The dependences are shown on the basis which the system calculates test parameters such as friction force, friction path, wear rate. In the paper there is shown an example of the interface of the program which controls tests and also a method for the calibration of wear sensors is described. A program window is shown in which a value of joint wear in a sample and counter-body is registered.

Key words: friction, automation, tribotechnical tests, wear, DAQ-techniques.

Введение

Современное многообразие материалов и методов их обработки остро ставит вопрос о совершенствовании методов испытаний для определения всего необходимого комплекса их свойств [1]. Данная задача наиболее актуальна для триботехнических испытаний, особенностью которых является продолжительность проведения. При этом учет всех влияющих факторов приводит к значительным временным затратам для определения триботехнических свойств даже узкого класса материалов.

С другой стороны, интенсивное развитие вычислительной техники и функциональных возможностей электронных средств, а также постоянное совершенствование устройств для испытаний позволяют создать информационно-измерительные системы и автоматизированные испытательные станции. Следствием этого является появление специализированных машин, комплектов для контроля качества и статистической оценки свойств материалов по стандартизированным методикам, обеспечивающим автоматическое управление режимами испытаний, централизованный сбор информации в многоточечных системах и обработку однотипных результатов испытаний.

Постановка задачи и объект исследования

В качестве объекта автоматизации была выбрана машина трения, предназначенная для проведения испытаний на изнашивание при возвратно-поступательном

движении. Устройство таких машин достаточно просто: электродвигатель посредством кривошипно-шатунного механизма передает движение на контртело, к которому набором грузов прижимается испытуемый образец. В процессе испытаний измеряется линейный и массовый износ путем сопоставления линейных размеров и массы образца до начала испытаний и после их завершения. Однако в современных условиях таких выходных параметров может быть недостаточно. В частности, может потребоваться измерение коэффициента трения и температуры в зоне трения на всем этапе проведения испытаний. В этой связи целесообразно провести автоматизацию испытательной машины, позволяющую проводить испытания на износ при возвратно-поступательном движении. Кинематическая схема автоматизированной машины приведена на рис. 1 [2].

Автоматизация данной установки заключается во включении в испытательную машину информационной измерительной системы, выполняющей сбор, обработку данных и предоставляющей результаты в режиме реального времени. Основным компонентом такой системы является устройство DAQ (Data Acquistion – сбор данных) – модуль или карта ввода-вывода (сбора) данных.

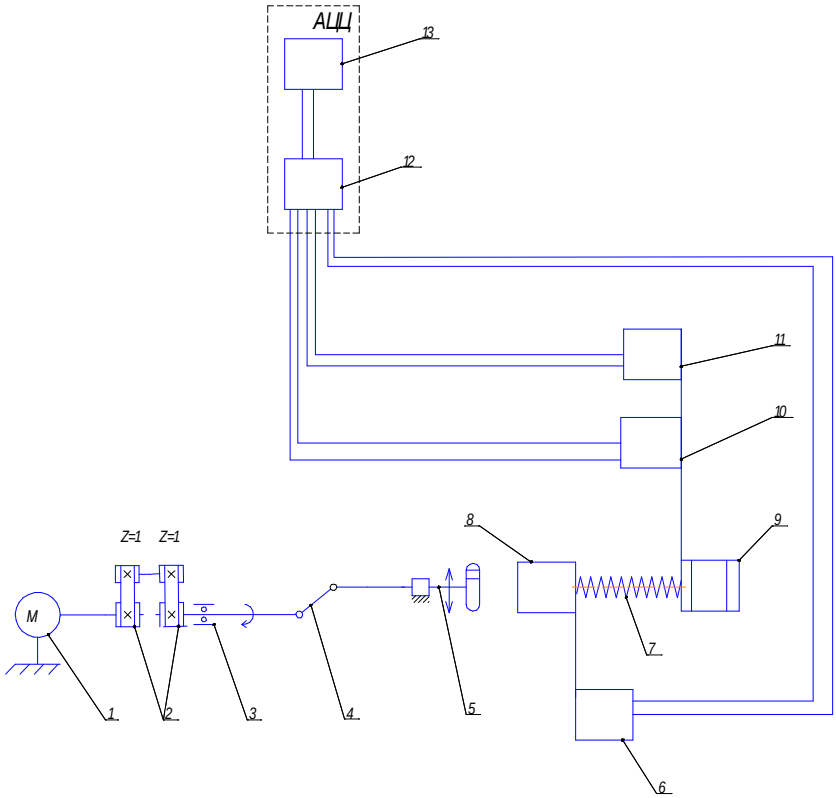


Рис. 1. Кинематическая схема испытательной машины:
1 – электродвигатель; 2 – ременная передача; 3 – подшипник;
4 – кривошип; 5 – ползун; 6 – датчик расстояния; 7 – пружина;
8 – исследуемый образец; 9 – груз; 10 – датчик температуры;
11 – датчик циклов; 12 – реле; 13 – аналого-цифровой
преобразователь

Результаты и обсуждение

Устройство осуществления возвратно-поступательного движения осталось неизменным, автоматизации подверглась система измерения результатов испытаний. Вращение от электродвигателя 1 через ременную

передачу 2 передается на кривошип 4. Для обеспечения плавного вращения элементов конструкции относительно друг друга был установлен подшипник качения 3. От вала кривошипа возвратно–поступательное движение передаётся на ползун 5, который непосредственно взаимодействует с образцом 8. Образец 8 закреплён на пружине 7, к которой крепится груз 9. На установке размещаются бесконтактные датчики: датчик расстояния 6, датчик температуры 10 и датчик циклов 11. Датчики подключены к аналого-цифровому преобразователю 13. Функциональная схема испытательной машины представлена на рис. 2.

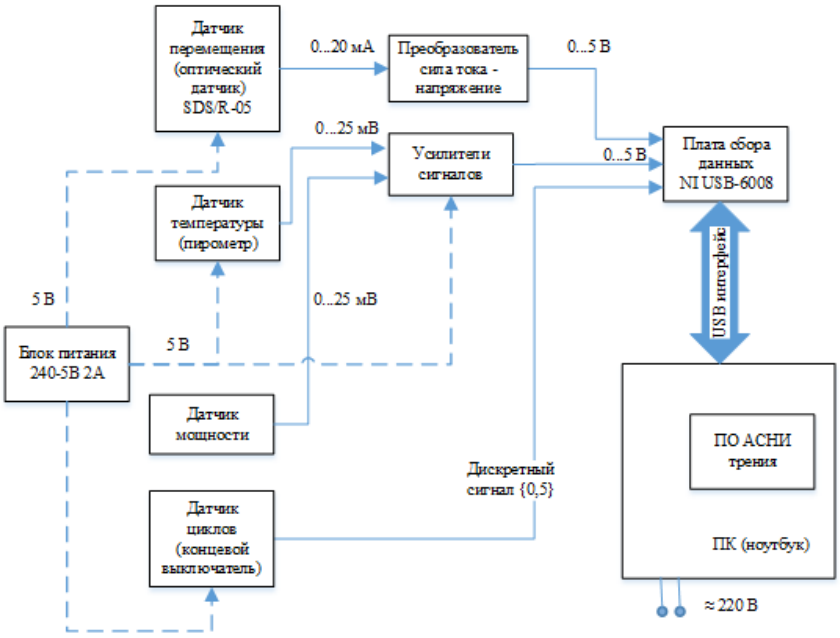


Рис. 2. Функциональная схема испытательной машины

С целью автоматизации были использованы датчики производства компании «Omron», характеристики которых приведены в таблице.

Таблица

Характеристики датчиков

Параметр	Датчик температуры ES1C	Датчик расстояния ZX1	Датчик циклов ZX-T
Расположение до контролируемой поверхности, мм	До 1000	65…135	До 1000
Диапазон измерений	0…400 ^{0}C	0…60 мм	-
Гистерезис, %	-	0,01	-
Точность	2 ^{0}C	-	-
Разрешение	1 ^{0}C	0,002 мм	-
Рабочая температура, ^{0}C	-15…+410	-30…+50	-30…+150

Принцип работы датчика циклов основан на фиксации отражения с поверхности контртела. В тот момент, когда контртело, совершая возвратно-поступательные движения, отходит с поля действия лазера датчика, происходит подсчет числа циклов. Датчики данного типа находят применение на конвейерных производствах при подсчете партии, прошедшей по конвейеру. В качестве управляющей платы обработки данных

была выбрана плата сбора данных NI USB-6008.

Алгоритм работы системы автоматики приведен на рис. 3. После запуска программы требуется задать длину трения L, которую проходит образец за один цикл, предельное значение износа h_d, после которого испытания следует прекратить, длину образца H_0, скорость скольжения образца V, массу контртела m, требуемую нагрузку P_0. На первом этапе автоматика проводит расчет значения нулевой нагрузки после подвода образца к контртелу. Также определяются начальные значения износа (h_0) и температуры (T_0), выполняется сброс числа циклов на ноль ($n_ц$=0).

В процессе испытаний определяется коэффициент трения $k = F_{тр} / N$ в текущий момент времени. Для этого вычисля.тся ускорение $a = V^2$, сила сопротивления опоры $N = mg$, сила трения $F_{тр} = P - ma$. Сила трения определяется по второму закону Ньютона. Если на тело действует постоянная сила $P > F_{тр}$, параллельная поверхности соприкасающихся тел, то при скольжении тела результирующая составляющая силы в горизонтальном направлении будет равна $P - F_{тр}$. Тогда ускорение тела связано с результирующей силой: $a = (P - F_{тр}) / m$. В процессе всего цикла испытаний в текущий момент времени определяются путь трения $S = Ln_ц$ и интенсивность изнашивания $I = h / S$. В ходе испытаний на экране монитора строятся графики зависимости температуры T, износа h, пути трения S и интенсивности изнашивания I от продолжительности испытаний.

Также в процессе испытаний контролируется перегрев системы. Если в зоне трения температура превысит 150 ^{0}C, то это может привести к перегреву датчиков и выходу из строя системы в целом. На такой случай предусмотрено экстренное отключение всех датчиков и электродвигателя. Кроме того, предусмотрено отключение системы при износе образца до держателя.

Обработка результатов испытаний проводится в автоматическом режиме с помощью специально разработанных программных средств – запрограммированного микроконтроллера. Плата сбора данных NI USB-6008 позволяет воспринимать сигналы с нескольких каналов. Сигнал с датчиков принимается на ПК в виде графика зависимости напряжения от времени. Далее сигнал программно обрабатывается. Для этого задаются первое и второе тарировочные значения, которые позволяют выполнить тарировку получаемого сигнала и получить коэффициенты преобразования (рис. 4). Для контроля точности тарировки предусмотрена возможность проконтролировать текущее расстояние, которое должно совпасть со значением, отображаемым на самом датчике.

Затем строится график зависимости рассматриваемого параметра от текущего момента времени (рис. 5). Программа также принимает сигналы с датчиков циклов, температуры, мощности, обрабатывает их и сохраняет в файле.

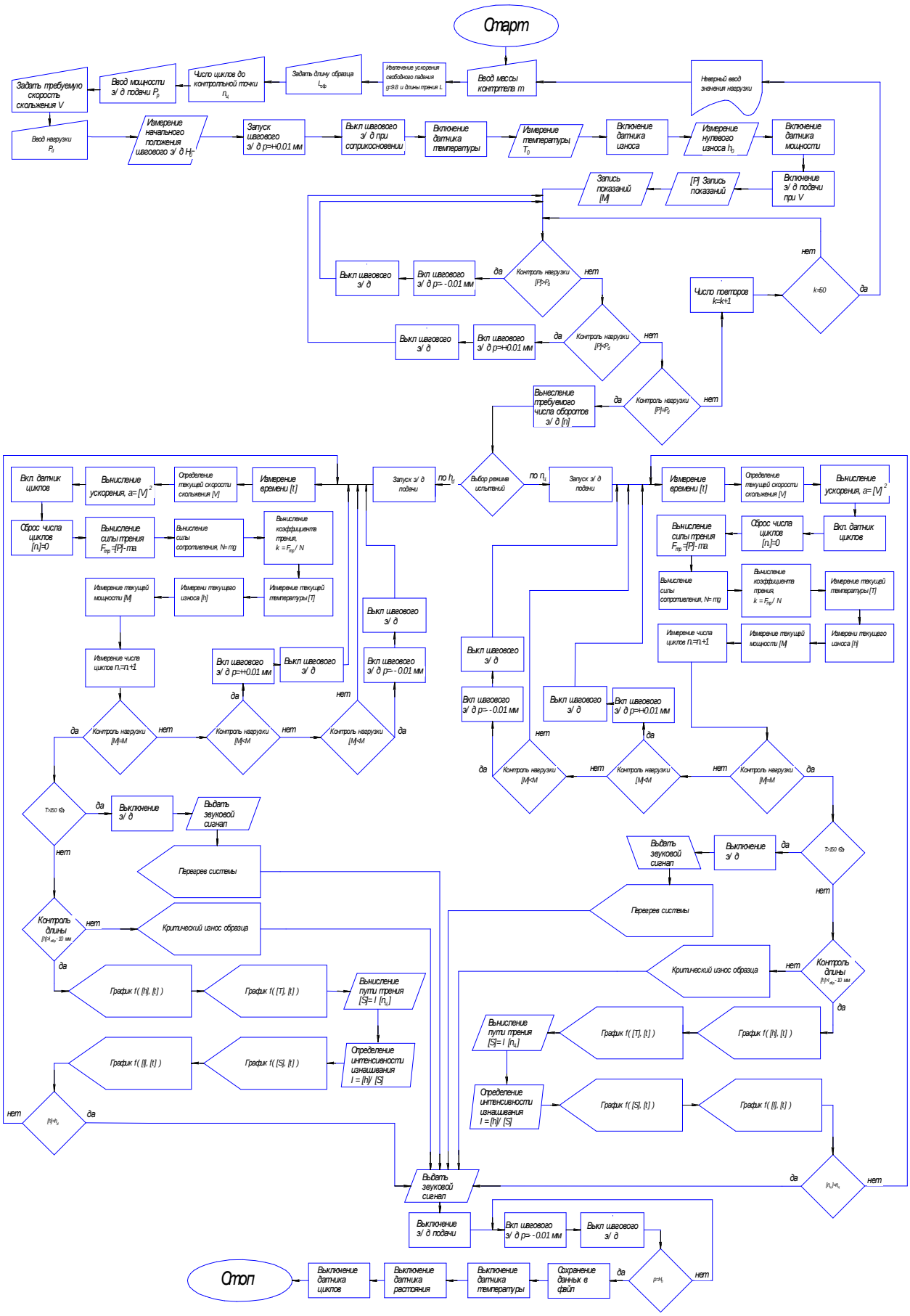


Рис. 3. Алгоритм работы системы автоматики машины трения:
[ ] – параметр, измеряемый в текущий момент времени

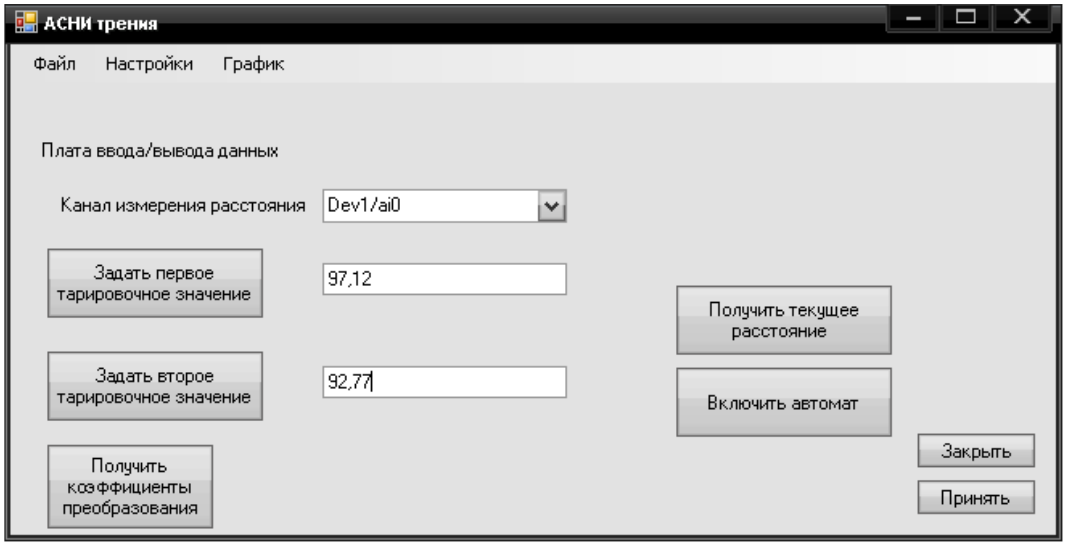


Рис. 4. Интерфейс настройки работы машины трения

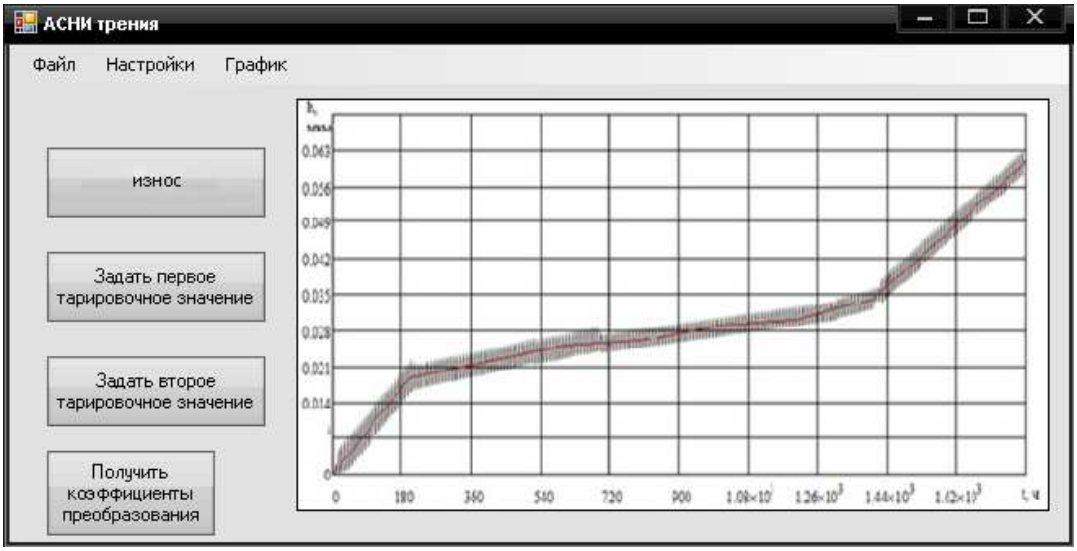


Рис. 5. График износа образца из стали 40Х

При испытаниях образцов на износ при возвратно-поступательном движении неизбежно возникают вибрации установки. В результате график износа, отображаемый на экране, имеет вид сигнала незатухающих колебаний (рис. 5). Программа автоматически строит усреднённую кривую и выводит ее на экран совместно с текущим графиком износа. Также предусмотрена возможность вывода зависимости температуры в зоне трения от времени проведения испытаний.

Недостатком данного способа автоматизации является измерение совместного износа образца и контртела. Для исключения этого недостатка необходимо в конструкции машины трения предусмотреть такое расположение датчика, контролирующего износ, чтобы луч от него был направлен непосредственно на след, оставляемый образцом на контртеле.

Заключение

Применение предложенной схемы автоматизации позволяет с достаточной степенью точности определять износ и температуру в зоне трения в текущий момент времени при испытаниях на изнашивание при возвратно-поступательном дви-

жении. Кроме того, применение данной схемы автоматизации позволяет ускорить процесс проведения испытаний в связи с отсутствием необходимости остановки испытательной машины для измерения промежуточных результатов, а также снизить влияние человеческого фактора на точность проведения испытаний. Предложенный принцип автоматизации был апробирован на машине трения и внедрен в исследовательский процесс на кафедре «УКСМ» Брянского государственного технического университета. Описанная схема автоматизации также может быть применена при испытаниях на износ при вращательном движении [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники и перечня критических технологий Российской Федерации».
2. Пат. 156860 РФ, МПК G01N3/56. Машина трения / Шалыгин М.Г., Сафонов А.Л.; заявитель и патентообладатель Брян. гос. техн. ун-т.— № 2015111033/28; заявл. 26.03.15; опубл. 10.11.15, Бюл. № 31.
3. Пат. 156176 РФ, МПК G01N3/56. Машина трения / Шалыгин М.Г., Киселёва А.В.; заявитель и патентообладатель Брян. гос. техн. ун-т.— № 2015109424/28; заявл. 17.03.15; опубл. 10.11.15, Бюл. № 31.

1. Decree of the President of the RF of July 7, 2011 № 899 “On the approval of priority trends in science, technics and technology and the list of critical techniques of the Russian Federation”.
2. Pat. 156860 RF, IPC G01N3/56. Friction Machine / Shalygin M.G., Safonov A.L.; Applicant and Patent Holder – Bryansk State Technical University — № 2015111033/28; applied 26.03.15; published 10.11.15, Bull. № 31.
3. Pat. 156176 RF, IPC G01N3/56. Friction Machine / Shalygin M.G., Kiselyova A.V.; Applicant and Patent Holder – Bryansk State Technical University — № 2015109424/28; applied 17.03.15; published. 10.11.15, Bull. № 31.

Статья поступила в редколлегию 28.10.2015.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Горленко О.А.

Сведения об авторах:

Шалыгин Михаил Геннадьевич, к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета, e-mail: migshalygin@yandex.ru.
Сафонов Александр Леонидович, к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета, e-mail: safonoval@yandex.ru.

Shalygin Mikhail Gennadievich, Can.Eng., Assistant Prof. Bryansk State Technical University, e-mail: migshalygin@yandex.ru.
Safonov Alexander Leonidovich, Can.Eng., Assistant Prof. Bryansk State Technical University, e-mail: safonoval@yandex.ru.

УДК 621.91.01
DOI: 10.12737/20293

А.Г. Серебренникова, М.А. Козлова, О.П. Харина

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрена программно-аппаратная реализация определения оптимальной скорости резания при обработке труднообрабатываемого материала на примере стали 12Х18Н10Т и сплава ВТ20. Описана методика проведения экспериментов, подтверждающих данный экспресс-метод.

Ключевые слова: программно-аппаратная реализация, титановый сплав ВТ20, сталь 12Х18Н10Т, скорость резания, мощность резания, температура резания, труднообрабатываемые материалы.

A.G. Serebrennikova, M.A. Kozlova, O.P. Kharina

FIRMWARE REALIZATION FOR OPTIMUM CUTTING SPEED DEFINITION AT HARD-TO-MACHINE MATERIAL WORKING

A scientific and technological advance is inseparably linked with the development of leading mechanical engineering branches: aerospace industry, rocket production, electronic and atomics, power and chemical engineering to which high requirements are made. A constant increase of requirements to the quality of complete products, their life and reliability causes a necessity to use the certain groups of materials possessing high mechanical strength, wear resistance, corrosion resistance, high temperature strength. To the materials with such properties belong alloys based on titanium and corrosion resistant steel forming hard-to-machine material group (HMG).

On the territory of the city of Komsomolsk-upon-Amur there are two works of defense industry (DIW). According to the mean estimate about 15-17% of DIW parts are used in ships, and about 10-20% - in planes.

The firmware realization for the optimum cutting speed definition at hard-to-machine material, by the example of 12H18N10T steel and TT20 alloy is considered. The procedure for carrying out experiments confirming this express-method is described.

Key words: firmware realization, TT20 titanium alloy, 12H18N10T steel, cutting speed, cutting temperature, hard-to-machine materials.

Непрерывное повышение требований к качеству готовых изделий, их долговечности и надежности вызывает необходимость применения определенных групп материалов, обладающих высокой механической прочностью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью. К материалам с такими свойствами относятся сплавы на основе титана и коррозионно-стойкие стали – материалы группы труднообрабатываемых (ТОМ).

Теоретическое обоснование процесса обработки материалов данной группы приведено в статьях [1;2]. В данной работе представлена реализация экспресс-метода определения оптимальной скорости резания.

Рассмотрим такой показатель, как мощность резания в виде функции скорости резания. В соответствии с известными зависимостями механики

$$W(V) = \frac{dA}{dt} = \frac{\int P(V)ds}{dt} = \int P(V)\frac{ds}{dt} = \int P(V)dV\,, \qquad (1)$$

где A – работа резания, Дж; P – сила резания, Н; V – скорость резания, м/с.

Представим падающую характеристику силы резания в виде какой-либо монотонно убывающей, например гиперболической, функции:

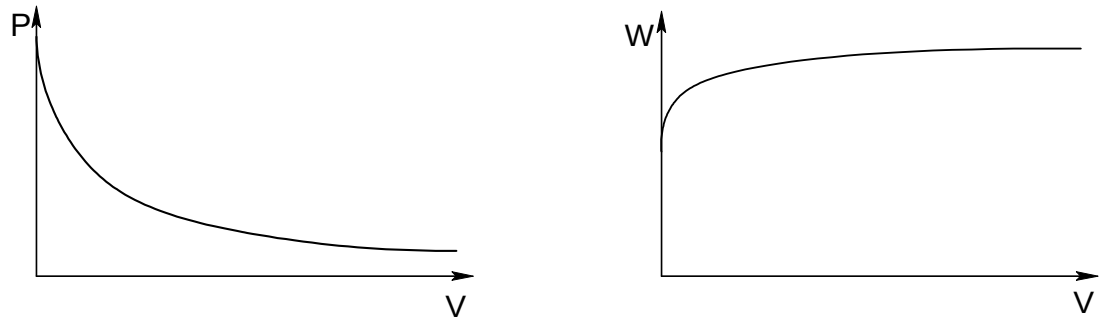
$$P_Z(V) = C_1 + \frac{C_2}{V}, \qquad (2)$$

где C_i – некоторые коэффициенты.

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим мощность резания в виде

$$W(V) = \int \left(C_1 + \frac{C_2}{V} \right) dV = C_1 V + C_2 \ln(V) + C_3 . \qquad (3)$$

В обобщенном виде графики функций приведены на рис. 1.



а) б)

Рис. 1. Обобщенные графики падающей характеристики, отображающие стабилизацию P и W

Пользуясь языком математического анализа и рассматривая мощность как функцию скорости, можно сказать, что выражение (3) является ограниченной сверху функцией, т.е.

$$\lim_{V \to \infty} W(V) < const .$$

Таким образом, границы диапазона оптимальных скоростей определяются как значения скорости резания, значительное увеличение которых не приводит к заметному росту мощности резания, при которых температура и равнодействующая сила резания принимают минимальные значения [4].

Тогда практическая задача сводится к определению границ такого диапазона. Теоретической методики расчета пока не создано, поэтому оптимальным на данном этапе является экспериментальный метод исследования.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы был разработан лабораторно-исследовательский комплекс на базе станка 1К625 и лабораторного стенда STD.201-2.

На рис. 2 представлен общий вид лабораторно-исследовательского комплекса. Основным элементом выступает динамометр STD 201-2, который функционально состоит из головки-резцедержателя, интерфейсного блока, модуля подключения датчиков, персонального компьютера и комплекта кабелей.

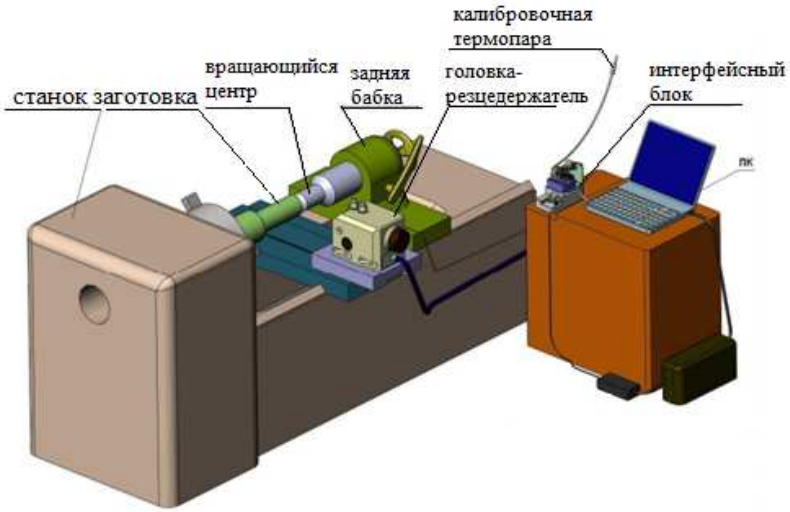


Рис. 2. Схема расположения лабораторно-исследовательского комплекса

В экспериментах использовались диски толщиной b = 3 мм и диаметром 180 мм из материалов 12Х18Н10Т и ВТ20,относящихся к группе ТОМ.

Базовое программное обеспечение динамометра STD 201-2, который входит в программно-аппаратный комплекс (ПАК), позволяет провести регистрацию сил резания и вибраций (рис. 3) и получить значения в виде примитивных графиков и таблицы. Это не позволяет в полной мере провести анализ полученных данных. Поэтому для более детального анализа был разработан алгоритм и программа, входящая в ПАК.

Рис. 3. Примеры регистрации вибрации, сил резания и температуры на динамометре STD 201-2

Программа реализована средствами программной среды MathLAB. Для работы программы необходимо наличие установленного пакета MathLAB на компьютере пользователя. Преимущество выбранного подхода к реализации программы заключается в скорости обработки данных. Так, при самой низкой дискретизации за время T = 1 с регистрируется 80 значений по каждой из осей по силе и более 2500 значений по температуре. Уже при времени обработки T = 600 с количество значений по каждой из осей по силе становится равным 48 000, по температуре – 1 500 000. Скорость обработки этих данных в программе не превышает 80 секунд. Окно программы для ввода исходных данных представлено на рис. 4.

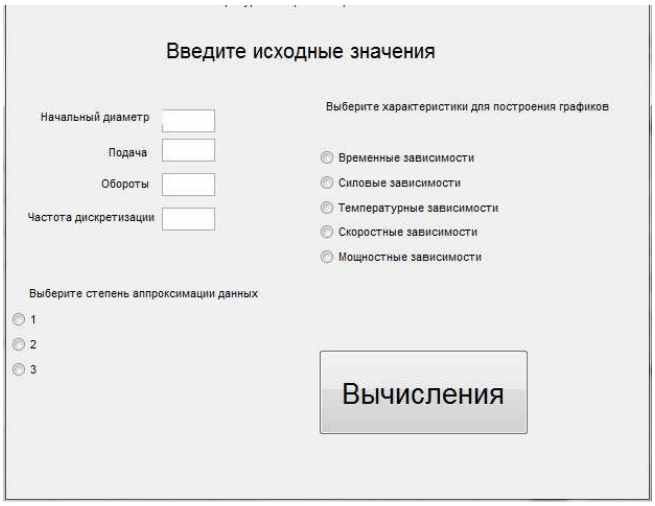


Рис. 4. Окно программы для ввода исходных данных

Исходные данные передаются в программу в виде файлов MS Office Excel, которые формирует ПАК. Далее программа считывает исходные значения и формирует массив данных для последующих расчетов и анализа. Программа исключает возможную погрешность при ручном анализе данных и позволяет пользователю моделировать различные зависимости при помощи графиков.

Методика проведения эксперимента:

1. Установить и закрепить диск в специальной оправке.

2. Установить оправку в патрон токарно-винторезного станка 1К625 и поджать задним центром. Способ крепления дисков представлен на рис. 5.

3. Закрепить резец в люльке резцедержателя лабораторного стенда.

4. Установить режимы обработки: частоту вращения n, подачу S.

5. Провести процесс обработки (рис. 5).

6. В процессе обработки дисков ведется обработка и перевод интерфейсным блоком динамических сигналов, поступающих с динамометра, в электрические, поступающие в системный блок компьютера, для записи на жесткий диск.

7. После обработки данных в программной среде STD 201-2, отображающей полученные значения на мониторе компьютера в виде графиков, происходит сохранение этих значений в Excel-файле в виде ряда чисел. Пример вывода данных в Excel представлен на рис. 6.

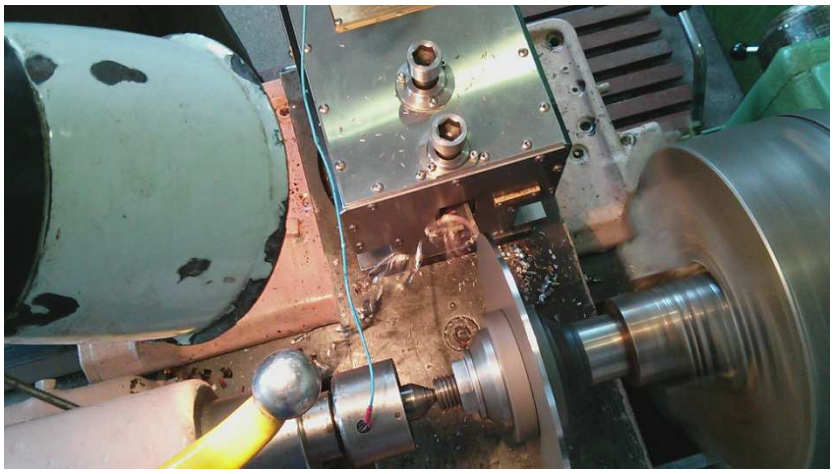


Рис. 5. Процесс обработки диска

	A	B	C	D	E	F
1	Время, с - Strain0 ()	Динамич. нагрузка, кгс - Strain0 ()	Время, с - Plot 1	Динамич. нагрузка, кгс - Plot 1	Время, с - Plot 2	Динамич. нагрузка, кгс - Plot 2
2	0	-2,25	0	44,54	0	20,13
3	0	-4,43	0	29,69	0	8,02
4	0	-3,68	0	48,82	0	27,56
5	0	-1,54	0	51,55	0	44,64
6	0,01	-0,7	0,01	35,95	0,01	9,3
7	0,01	2,88	0,01	41,02	0,01	11,51
8	0,01	4,49	0,01	46,3	0,01	44,78
9	0,01	-2,04	0,01	32,62	0,01	11,15
10	0,01	-5,61	0,01	33,14	0,01	-1,39
11	0,01	-1,51	0,01	37,82	0,01	31,74
12	0,01	0,72	0,01	41,08	0,01	23,56
13	0,01	2,71	0,01	53,95	0,01	26,11

Рис. 6. Пример вывода данных в Excel

8. Провести обработку сведенных усредненных значений в разработанной программе анализа данных.

Алгоритм обработки полученных значений состоит из следующих этапов:

1) расчет текущего диаметра диска D_i по формуле

$$D_i = D_0 - \frac{S_i n T_i}{60},$$

где D_0 = 180 – начальный диаметр диска, мм; T – текущее время, с; $S_{об}$ – подача на оборот, мм/об; n – частота вращения шпинделя, мин $^{-1}$;

2) расчет текущей скорости V_i по формуле

$$V_i = \frac{\pi D_i n}{1000};$$

3) расчёт равнодействующей силы резания по формуле

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2};$$

4) расчет мощности резания по формуле

$$N_{рез} = \frac{P_z V}{60 \cdot 102} + \frac{P_x S n}{1000 \cdot 60 \cdot 102},$$

где числа в знаменателе выражают перевод единиц измерения: 60 – минуты в секунды, 1000 – миллиметры в метры, 102 – Н·м/с – в кВт.

9. Построить графики зависимости параметров от времени T и скорости V.

10. Проанализировать получившиеся графики.

Исходные данные эксперимента были подобраны из расчета максимальной рекомендованной скорости резания, при которой работа станка протекает стабильно.

Обработка титанового сплава ВТ20

Исходные данные при обработке титанового сплава ВТ20: D_o = 180 – начальный диаметр диска, мм; S = 0,07 – подача, мм/об; n = 200 – частота вращения шпинделя, мин $^{-1}$.

Ниже представлены обобщенные данные анализа обработки трех дисков из указанного материала.

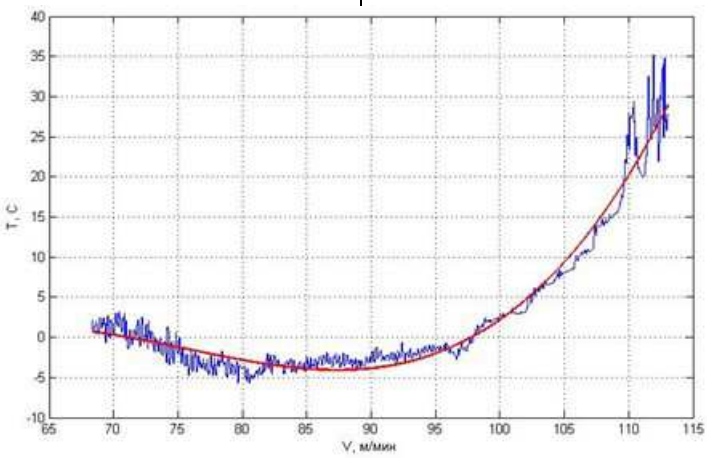


Рис. 7. График зависимости температуры резания T от скорости резания V

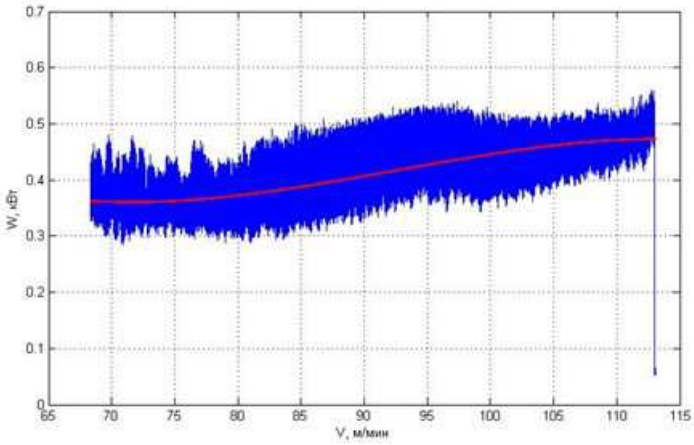


Рис. 8. График зависимости мощности резания W от скорости резания V

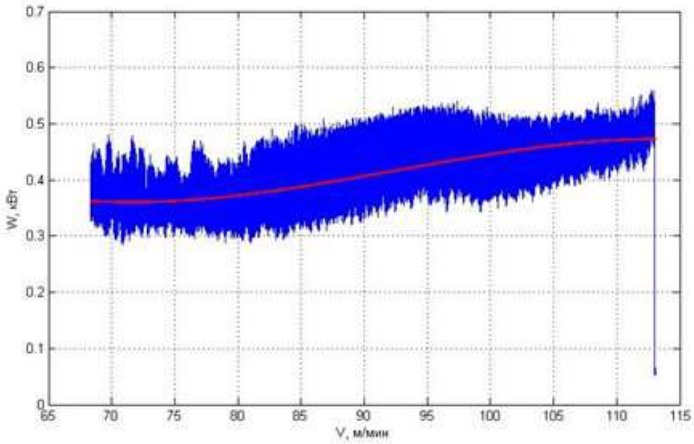


Рис. 9. График зависимости равнодействующей силы резания P от скорости резания V

Минимальные и максимальные значения основных характеристик анализируемых дисков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сводная таблица данных по трем дискам из материала ВТ20

№ диска	Характеристика	Минимальное значение	Максимальное значение
1	P_x, кгс	-6,28	2,85
	P_y, кгс	-2,25	100,3
	P_z, кгс	0,47	76,9
	P, кгс	0,14	115,9
	T, °C	-2,85	19,53
	V, м/мин	67,65	113,04
	W, кВт	0	0,09
2	P_x, кгс	-11,01	6,16
	P_y, кгс	44,48	140,9
	P_z, кгс	28,48	96,41
	P, кгс	57,00	158,48
	T, °C	1,71	237,16
	V, м/мин	44,6	56,52
	W, кВт	0,03	0,09
3	P_x, кгс	-8,5	-0,5
	P_y, кгс	39,127	100,95
	P_z, кгс	29,45	60,21
	P, кгс	50,45	112,19
	T, °C	-14,9	52,3
	V, м/мин	64,11	113,04
	P_x, кгс	0,03	0,09

Средние значения характеристик анализируемых дисков приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения характеристик по трем дискам

Характеристика	Минимальное значение	Максимальное значение
P_x, кгс	-8,60	2,84
P_y, кгс	27,12	114,05
P_z, кгс	19,47	77,84
P, кгс	35,86	128,86
T, °C	-5,35	103,00
V, м/мин	58,79	94,20
P_x, кгс	0,02	0,09

Сравним эмпирически полученные значения оптимальной скорости резания, определенные по графику зависимости мощности резания W от скорости резания V, с теоретическими (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение эмпирических и теоретических значений

Скорость резания	Эмпирическое значение, м/мин	Теоретическое значение, м/мин
V1	85-103	28-90
V2	109	
V3	95	

Обработка нержавеющей стали 12Х18Н10Т

Исходные данные при обработке нержавеющей стали 12Х18Н10Т: D_o = 180 – начальный диаметр диска, мм; S = 0,07 - подача, мм/об; n = 100 – частота вращения шпинделя, мин $^{-1}$.

Ниже представлены обобщенные данные анализа обработки трех дисков из указанного материала.

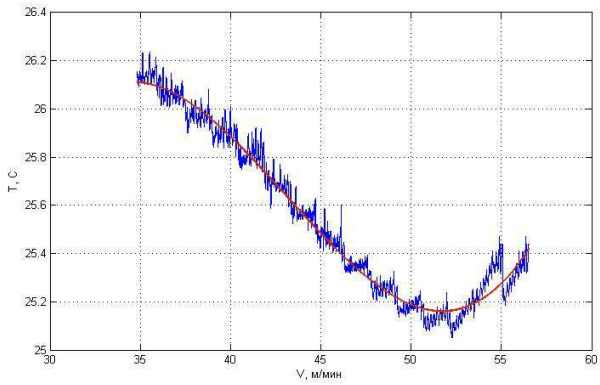


Рис. 10. График зависимости температуры резания T от скорости резания V

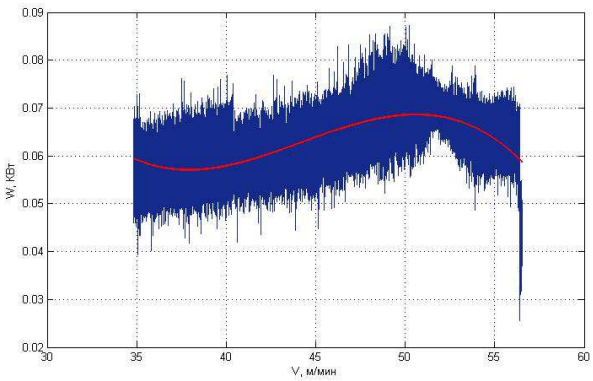


Рис. 11. График зависимости мощности резания W от скорости резания V

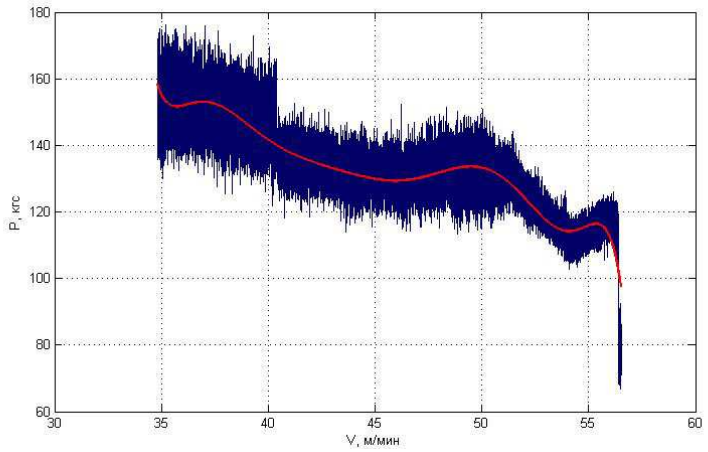


Рис. 12. График зависимости равнодействующей силы резания P от скорости резания V

Минимальные и максимальные значения основных характеристик анализируемых дисков приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сводная таблица данных по трем дискам из материала 12Х18Н10Т

Номер диска	Характеристика	Минимальное значение	Максимальное значение
1	P_x, кгс	-2,975	6,29
	P_y, кгс	4,28	125,4
	P_z, кгс	-15,6	125,1
	P, кгс	5,299	163,7
	T, °C	25,14	25,44
	V, м/мин	56.5	34.81
	W, кВт	-0,01	0,08
2	P_x, кгс	-10,39	-1,9
	P_y, кгс	61,128	153,17
	P_z, кгс	20,95	148,22
	P, кгс	75,85	199,19
	T, °C	24,93	27,22
	V, м/мин	56,52	34,07
	W, кВт	0,00185	0,09
3	P_x, кгс	-7,43	3,06
	P_y, кгс	75,81	117,66
	P_z, кгс	29,9	123,5
	P, кгс	89,06	159,9
	T, °C	72,1	223,7
	V, м/мин	56,5	40,43
	W, кВт	0,027	0,1

Средние значения характеристик анализируемых дисков приведены в табл. 5.

Таблица 5

Средние значения характеристик по трем дискам

Характеристика	Минимальное значение	Максимальное значение
P_x, кгс	-6,93	2,48
P_y, кгс	47,07	132,08
P_z, кгс	11,75	132,27
P, кгс	56,74	174,26
T, °C	40,72	92,12
V, м/мин	56,51	36,44
W, кВт	0,01	0,09

Сравним эмпирически полученные значения оптимальной скорости резания, определенные по графику зависимости мощности резания от скорости, с теоретическими значениями (табл. 6).

Таблица 6

Сравнение эмпирических и теоретических значений

Скорость резания	Эмпирическое значение, м/мин	Теоретическое значение, м/мин
V1	52	30-56
V2	54	
V3	55	

Эмпирически определенные значения скорости резания V входят в интервал рекомендуемых значений. Мы предполагаем, что предложенная методика для определения оптимальной скорости резания верна и подойдёт для других групп материалов. Однако данное предположение требует дальнейших экспериментальных исследований.

Выводы:

1. Оптимальным является такое значение скорости V_{opt}, дальнейший рост которого не приводит к увеличению мощности резания W и температуры T в зоне обработки.

2. Согласно данным, полученным при обработке титанового сплава ВТ20, эмпирическое значение скорости резания немного превышает ее теоретическое значение.

3. При обработке нержавеющей стали 12Х18Н10Т полученные значения попадают в теоретический диапазон.

4. Разработан алгоритм и ПАК для расчета оптимальной скорости резания.

5. Определена оптимальная скорость резания материала ВТ20, которая равна 105 м/мин.

6. Определена оптимальная скорость резания материала 12Х18Н10Т, которая равна 53 м/мин.

Работа выполнена при поддержке грантов № 2014/68 (код проекта 254) и № 9.251.2014 (код проекта 251) Министерства образования и науки РФ, а также в рамках магистерской диссертации одного из соавторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреев, С. В. Высокоскоростное фрезерование труднообрабатываемых материалов / С.В. Бреев, А.Г. Серебренникова// Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – Комсомольск н/А: КнАГТУ, 2013. – № 3-1 (15). – С. 52 – 60.
2. Бреев, С.В. Теоретическое обоснование высокоскоростной обработки труднообрабатываемых материалов / С.В. Бреев, А.Г. Серебренникова, М.А. Козлова// Сборник научных трудов SWorld. – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2014. – Вып. 3(36). - Т. 5. – 96 с.
3. Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения: материалы междунар. науч.-техн. конф. (г. Комсомольск-на-Амуре, 12-16 мая 2015 г.) / редкол.: О.Ю. Еренков (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск н/А: КнАГТУ, 2015. – 320 с.
4. Температурно-мощностной критерий как способ определения зоны высокоскоростной обработки труднообрабатываемых материалов /С.В. Бреев, А.Г. Серебренникова, М.А. Козлова// Современные материалы, техника и технология: 4-я междунар. практ. конф. (г. Курск, 25-26 дек. 2014 г.). – Курск, 2014. – С. 96-102.

1. Breyev, S.V. Hard-to-machine material high-speed milling / S.V. Breyev, A.G. Serebrennikova// Proceedings of Komsomolsk-upon-Amur State Technical University. Science of Nature and Techniques. – Komsomolsk-upon-Amur: K/ASTU, 2013. – № 3-1 (15). – pp. 52 – 60.
2. Breyev, S.V. Theoretical justification of hard-to-machine material high-speed working / S.V. Breyev, A.G. Serebrennikova, M.A. Kozlova// Proceedings of SWorld. – Odessa: KUPRIENKO S.V., 2014. – Issue 3(36). Vol. pp. 5. – 96.
3. Problems and achievements in innovation materials and technologies of mechanical engineering: Proceedings of Inter. Science-Tech. Conf. (Komsomolsk-upon-Amur, May 12-16, 2015) / Editorial board: O.Yu. Yerenkov (executive editor) [et al.]. – Komsomolsk-upon-Amur: K/ASTU, 2015. – pp. 320.
4. Temperature –power criterion as a method for definition of hard-to-machine material high-speed working area /S.V. Bryev, A.G. Serebrennikova, M.A. Kozlova// Modern Materials, Technics and technology: 4-th Inter. Pract. Conf. (Kursk, December 25-26, 2014). – Kursk, 2014. – pp. 96-102.

Статья поступила в редколлегию 21.12.2015.
Рецензент: д.т.н., профессор КнАГТУ
Шпилев А.М.

Сведения об авторах:

Серебренникова Анжела Геннадьевна, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», г. Комсомольск-на-Амуре, e-mail: S_angel@kmscom.ru.
Козлова Мария Андреевна, магистрант кафедры «Технология машиностроения», г. Комсомольск-на-Амуре, e-mail: makozlova@gmail.com.
Харина Ольга Петровна, кафедра «Высшая математика», г. Комсомольск-на-Амуре, e-mail: mathlady@mail.ru.

Serebrennikova Angela Gennadievna, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Engineering Techniques”, Komsomolsk-upon-Amur, e-mail: S_angel@kmscom.ru.
Kozlova Maria Andreyevna, Master undergraduate of the Dep. “Engineering Techniques”, Komsomolsk-upon-Amur, e-mail: makozlova@gmail.com.
Kharina Olga Petrovna, Dep. “Higher Mathematics”, Komsomolsk-upon-Amur, e-mail: mathlady@mail.ru.

УДК 338
DOI: 10.12737/20295

ЭКОНОМИКА И МЕНЕДЖМЕНТ

Е.Н. Стрижакова

ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Проанализированы существующие подходы к определению эффективности использования ресурсов промышленных предприятий. Показан набор параметров для оценки аллокативной эффективности всех видов ресурсов: труда, капитала, информации, человеческого капитала. Предложены показатели для оценки адаптивной и синергетической эффективности.

Ключевые слова: эффективность, ресурсы, аллокация, адаптация, синергетическая эффективность, промышленность.

E.N. Strizhakova

EFFICIENCY INDICES OF RESOURCE USE AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

The current approaches to the efficiency definition of resource use at industrial enterprises are analyzed. According to existing theories of a firm, in a general case in economy there are emphasized three kinds of efficiency: allocative, adaptive and synergetic.

The economic theory of welfare considers the efficiency of resource distribution and use with the application of five paradigms: a utilitarian criterion, criteria of Rawls, Kaldor-Hicks, T. Skitovsky and A. Bergson. For the assessment of a living standard of people the economic science uses a number of factors, such as Gross Domestic Product, National Income, a level of social life development. But their application is possible only at the macrolevel of control. At the level of an enterprise or a sector the group of investment efficiency indices can be used as a basic one. The efficiency in the financial analysis can be estimated with the use of two basic criteria: profitability, profit value. In the paper there are shown values used for the assessment of allocative efficiency of all kinds of resources separately – labour, capital, information, human capital. Merits and demerits in the computation of “labour productivity” index are shown. The occurring inaccuracies are presented in the assessment of work done, that resulted in the distortion of the current situation estimate in an industrial system and also in the elaboration of wrong management solutions. The author has offered a set of parameters, an aggregative index – share ratio coefficient of intensive and extensive factors for the definition of an allocative efficiency system. In the paper there are presented concepts of adaptive and synergetic efficiency, the existing values of the assessment of the mentioned kinds of efficiency are analyzed are combined into into a single model.

Key words: effectiveness, resources, allocation, adaptation, synergetic efficiency, industry.

Существует несколько подходов к сущности предприятий и показателям эффективности их деятельности. Так, Е.В. Попов [1] выделяет в общем виде две группы теорий предприятия: фундаментальные и прикладные. В свою очередь, фундаментальные делятся на технологические, имеющие в своем составе неоклассические и альтернативные теории, и институциональные.

Неоклассические теории включают в себя теории максимизации прибыли предприятия, максимизации выручки, максимизации полезности менеджерами, а альтернативные - теорию Х-эффективности, информационную, эволюционную теории, теорию бихевиоризма, теории экспериментальной экономики, имитационного моделирования, теорию игр. Неоклассическая теория фирмы рассматривает предприятие как некоторую систему, результатом деятельности которой является преобразование ресурсов в продукцию, при этом принимаются во внимание ограничения со стороны используемой технологии, со стороны потребителей, конкурентов и других контрагентов. Важным моментом в данной теории является предположение о том, что фирма при всех возможных обстоятельствах выбирает допустимый вариант своего функционирования, максимизирующий ее прибыль [2].

Институциональная теория фирмы относит к фирме ту организацию, которая преобразует исходные ресурсы в конечный продукт [3]. Институциональные теории

рассматривают концепции агентских отношений, транзакционной экономики, общественного выбора, когнитивного развития, прав собственности, экстерналий, институтов/барьеров, инсайдеров/аутсайдеров, институциональных ловушек.

Прикладные теории организации можно разделить на маркетинговый анализ, разработку товаров, теории ценообразования товаров, маркетинговых коммуникаций, менеджмента, финансового анализа, логистики, контроллинга, стратегического маркетинга, жизненного цикла товаров.

В дальнейшем под теорией предприятия, согласно Г.Б. Клейнеру, будем понимать систему взглядов, ограниченную снизу целями ее построения, необходимостью описания структуры и факторов функционирования заданного множества предприятий, сверху - предметом исследования, т.е. предприятием, рассматриваемым как целостность [4].

Применительно к промышленной системе анализ показателей эффективности может идти по следующим трем направлениям: аллокативная эффективность, эффективность адаптации и системная эффективность. В общем случае автором предлагается использовать показатели аллокативной эффективности как показатели эффективности использования ресурсов, а показатели адаптивной и системной эффективности - как показатели эффективности факторов промышленной системы в целом.

Под аллокативной (аллокационной) эффективностью в экономике понимается производство наилучшей (оптимальной) комбинации продуктов с помощью наиболее эффективной комбинации ресурсов.

Эффективной является такая комбинация ресурсов, при которой обеспечивается производство продукции с минимальными альтернативными издержками. Такое использование ресурсов иногда называется технически эффективным [5]. С точки зрения О.С. Сухарева, среди подвидов аллокативной эффективности необходимо выделять эффективность обмена, эффективность потребления, эффективность производства, эффективность распределения, эффективность инвестиций [6]. Таким образом, аллокативная эффективность включает в себя как производство продукции с минимальными затратами (техническую эффективность), так и эффективность распределения имеющихся ресурсов, или, согласно М. Фареллу [7], «оптимальной комбинации ресурсов при заданном уровне объема продукции». В дальнейшем мы будем использовать термин «аллокативная эффективность», придерживаясь данной точки зрения.

Эффективность использования и распределения ресурсов как между людьми, так и между отраслями в промышленном производстве рассматривается в рамках теории благосостояния, которая представляет собой нормативный аспект экономической науки. В неоклассической экономической теории основными концепциями считаются эффективность по Парето, концепции целей общества, компенсационный критерий эффективности Калдора-Хикса, двойной критерий Скитовски, концепции функций общественного благосостояния, теория «второго лучшего», концепция экономического роста как показателя эффективности, концепции натуральных показателей эффективности, показателей счастья, синтетических индикаторов эффективности развития человеческого потенциала [8].

Двумя известными экономистами - А. Пигу и В. Парето были разработаны теории благосостояния. Парето создал основу теории благосостояния, при этом для вывода своего критерия он использовал кривые безразличия, предложенные Эджуортом. Диаграммы Эджуорта используются в процессе анализа эффективности, в ходе которого происходит распределение ограниченных ресурсов - труда и капитала между производством благ X и У. Распределение ресурсов может быть охарактеризовано как производственно-эффективное, если единственным способом увеличить выпуск одного товара является сокращение выпуска второго. Производственно-эффективное распределение ресурсов наблюдается в точках касания изоквант, в которых перераспределение ресурсов не

приводит к увеличению совокупного производства, при этом $MRTS^{X}_{KL} = MRTS^{Y}_{KL}$.

Критерий (оптимум) Парето - это максимум благосостояния, при котором невозможно улучшить положение кого бы то ни было путем изменения объема производства или обмена без ухудшения положения кого-то другого [5]. Ситуация, в которой улучшение положения одного индивида за счет перераспределения ресурсов не ухудшает положения других, называется улучшением по Парето.

А. Пигу, в отличие от Парето, в процессе разработки направлений обеспечения благосостояния использовал метод сравнения полезности между индивидами [5]. При этом им была предложена политика увеличения общественного благосостояния, основанная на поддержании предельных издержек для общества на постоянном уровне во всех отраслях.

Экономическая теория благосостояния рассматривает следующие основные критерии оптимальности общественного благосостояния:

1. Утилитаристский критерий, согласно которому необходимо увеличить благосостояние общества путем максимизации суммы индивидуальных благосостояний всех индивидов.

2. Критерий Роулза, применение которого предполагает использование наименьшей величины из индивидуальных благосостояний в качестве критерия общественного благосостояния.

3.Критерий Калдора - Хикса, согласно которому общественное благосостояние увеличивается, если сумма выигрышей оценивается выше, чем сумма проигрышей.

4. Критерий Т. Скитовски, утверждающий, что благосостояние повышается только тогда, когда движение из одной точки в другую улучшает положение по Калдору - Хиксу, а обратное движение не вызывает этого улучшения. Очевидным недостатком использования данного критерия является различие в предельной ценности ресурсов для различных индивидов или хозяйствующих субъектов.

5. Критерий А.Бергсона, предполагающий установление критериев справедливости и равноправия экономистами, законодательными органами, правительственными учреждениями. Использование данного подхода позволяет исключить субъективные оценки индивидов, применяя только функцию общественного благосостояния.

Благосостояние в самом общем виде характеризует уровень жизни людей. Существует достаточно большое количество показателей, на основании которых можно судить о благосостоянии страны: валовой национальный продукт; валовой внутренний продукт; национальный доход; уровень безработицы; политическая стабильность и безопасность; климатические условия; степень удовлетворённости системой здравоохранения страны; уровень развития общественной жизни. В предыдущей работе [9] были исследованы достоинства и недостатки существующих показателей благосостояния, применение большинства из которых для оценки эффективности экономической системы возможно только на макроуровне. На мезо- и микроуровне можно рассматривать методику анализа капиталовложений как основную для оценки общей аллокативной эффективности. При этом анализ и оценка денежных потоков предполагает возможным использование двух групп показателей.

Первая группа показателей оперирует учетными оценками показателей, при использовании которых временная оценка не учитывается. К этой группе показателей относятся: срок окупаемости инвестиций, представляющий собой число лет, в течение которых инвестиции будут погашены кумулятивным доходом; коэффициент эффективности инвестиций, или учетная норма прибыли, рассчитываемая как отношение среднегодовой прибыли к средней величине инвестиций.

Вторая группа показателей основана на дисконтированных оценках, учитывающих разную стоимость денег во времени. К данной группе относятся показатели: чистый дисконтированный доход (чистая приведенная стоимость); чистая терминальная стоимость; внутренняя норма

прибыли; дисконтированный срок окупаемости инвестиций.

При расчете чистого дисконтированного дохода происходит сопоставление потоков, поступающих на предприятие, и оттоков ресурсов. При этом происходит дисконтирование всех потоков, т.е. приведение их к начальному моменту времени для того, чтобы можно было осуществить над ними математические действия (сложение, вычитание и т.д.).

Расчет чистой терминальной стоимости аналогичен расчету чистого дисконтированного дохода, однако потоки приводятся с помощью операции наращения к моменту окончания проекта.

Внутренняя норма доходности (прибыли инвестиций, внутренний коэффициент окупаемости) представляет собой величину ставки дисконтирования, при которой значение чистого дисконтированного дохода проекта равно нулю. Если внутренняя норма доходности превышает значение цены капитала, то вложения в инвестиционный проект являются выгодными.

Дисконтированный срок окупаемости представляет собой момент времени, когда величина дисконтированных входящих потоков превысит дисконтированную величину оттоков.

В самом общем виде эффективность хозяйствующего объекта характеризуется полученной прибылью и рентабельностью деятельности. Эффективность деятельности предприятия в финансовом анализе принято оценивать по текущей, инвестиционной и финансовой деятельности. Эффективность текущей деятельности характеризуется показателями деловой активности, рентабельности и эффективности производства. Деловая активность (оборачиваемость) показывает, насколько эффективно используются активы предприятия. Коэффициенты деловой активности позволяют проанализировать эффективность использования средств предприятием. Как правило, к этой группе относятся различные показатели оборачиваемости. Существует шесть главных показателей оборачиваемости, которые определяются отношением выручки к соответствующей части актива.

Рентабельность характеризует прибыльность деятельности предприятия. Существует четыре показателя рентабельности: рентабельность реализации (отношение прибыли к себестоимости), рентабельность работы предприятия в целом (отношение прибыли к средней величине активов), рентабельность использования оборотных активов (отношение чистой прибыли к средним оборотным активам), рентабельность собственного капитала (отношение чистой прибыли к среднегодовой сумме собственного капитала).

Рентабельность работы предприятия в целом показывает, сколько денежных единиц потребовалось фирме для получения одной денежной единицы прибыли (независимо от источника привлечения этих средств). Это основной показатель, характеризующий конкурентоспособность предприятия, а не его продукции. Уровень конкурентоспособности определяется посредством сравнения рентабельности всех активов анализируемого предприятия со среднеотраслевым коэффициентом.

Эффективность производственной деятельности определяется следующими показателями: рентабельность изготовляемой продукции, коэффициент затрат (отношение себестоимости к выручке).

Аллокативная эффективность может быть также определена как эффективность отдельных факторов производства.

Оценка эффективности использования основных фондов проводится на основании показателей отдачи и емкости. Показатель фондоотдачи показывает величину готовой продукции, приходящейся на 1 руб. ресурсов. Показатель фондоемкости характеризует затраты ресурсов на 1 руб. выпуска продукции.

Также к общим показателям использования основных фондов относят рентабельность основных фондов, представляющую собой отношение прибыли к стоимости основных фондов; фондооснащенность, находящуюся как отношение среднесписочной численности к стоимости основных средств; обратный последнему показатель - фондовооруженность, а также интегральный показатель, рассчитываемый как квадратный корень из произведения

рентабельности основных фондов на их фондоотдачу.

Частные показатели использования основных средств принято разделять на экстенсивные и интенсивные. Использование основных фондов во времени характеризуют показатели экстенсивного использования, например коэффициент экстенсивного использования оборудования, представляющий собой отношение фактического времени работы оборудования к времени работы оборудования по норме. Также в данную группу входят коэффициент сменности работы оборудования, коэффициенты использования планового, режимного и календарного времени работы оборудования, показатель внутрисменных простоев [10].

Величина выпуска продукции за единицу времени находит свое отражение в показателе интенсивного использования основных средств, представляющем собой отношение фактической к технически обоснованной выработке продукции основным средством в единицу времени.

Существует также интегральный коэффициент использования оборудования, представляющий собой произведение интенсивного и экстенсивного коэффициентов работы оборудования.

Эффективность использования трудовых ресурсов предприятия зачастую принято отражать показателем «производительность труда». Однако при расчете данного показателя возникает ряд вопросов. Во-первых, под производительностью труда экономистами понимаются три разных показателя. Первый из них аналогичен трудоемкости и рассчитывается как количество времени, затраченное на производство единицы продукции, второй, аналогично выработке, - как отношение произведенной продукции к среднесписочной численности, а третий находится как стоимость обработки, или разность между стоимостью товарной продукции и стоимостью сырья, основных материалов, прибылью предприятия. Естественно, при разных вариантах расчета показатели становятся несопоставимыми между собой, что вызывает первую методологическую проблему расчета и учета показателей ряда отраслей. В результате это приводит к определённым искажениям существующей ситуации в промышленности, а затем, как следствие, и к неверным выводам, ошибочным прогнозам развития, потерям возможных резервов и неверным рекомендациям по развитию и поддержке отраслей экономики страны в целом.

Второй проблемой является несовершенство используемых методик анализа производительности труда, что приводит к тем же последствиям [11].

Третья трудность расчета производительности труда заключается в том, что производительность труда является результирующим показателем, зависящим не только от степени использования труда, но и от величины и степени использования человеческого потенциала, технической и технологической оснащенности производства. Часто в англоязычной литературе, например в Словаре современной экономической теории Макмиллана, термин «производительность труда» употребляется как синоним термина «производительность», т.е. отношение объема производства к объему использованных ресурсов (труда и капитала).

Четвертой проблемой является системный характер показателя, особенно если мы используем выработку как показатель производительности труда. Так, сокращение числа занятых формально приведет к росту производительности труда, однако реальная потеря необходимых кадров может значительно снизить конкурентные преимущества предприятия.

Следующим недостатком применения показателя «производительность труда» является невозможность с помощью его расчета оценить качество трудовых ресурсов, а также эффективность их использования.

Шестой недостаток - отсутствие сведений о величине этого показателя в некоторых видах экономической деятельности.

Последняя, комплексная проблема, связанная с производительностью труда, - это проблема оценки и выбора направлений воздействия на факторы роста производительности труда.

Одним из названных недостатков применения показателя «производительность труда» для определения эффективности использования трудовых ресурсов является неполное отражение в нем качества труда, структуры трудовых ресурсов и различия в продуктивности разных групп работников предприятия, в том числе разной квалификации. Указанные выше характеристики труда находят свое отражение в показателе «эффективность труда». Эффективность труда характеризует уровень использования трудовых ресурсов с учетом выработки, затраченного времени и качества работы, а также затрат труда в расчете на одного работника [12]. При этом обобщающий показатель эффективности труда рассчитывается как отношение объема работ в единицу времени к количеству занятых, умноженное на показатель качества труда. Качество труда работников, занятых непосредственно процессом производства, может выражаться через показатели качества выпускаемой продукции, такие как процент брака в работе, процент сдачи результатов работы или число дефектов в работе.

Существуют также показатели технического уровня производства: удельный вес активной части производственных основных фондов в общем составе; группа показателей вооруженности труда (коэффициент электровооруженности, коэффициент энерговооруженности и коэффициент фондовооруженности рабочих); показатели уровня механизации и автоматизации производства (степень охвата рабочих механизированным трудом, уровень механизированного труда в общих трудозатратах) [13]. Использование данных показателей позволяет оценить текущее состояние и выделить направления совершенствования оборудования.

Основываясь на разработках О.С. Сухарева [14, с.249-252], можно предложить следующую систему показателей для оценки аллокативной эффективности ресурсов:

1. Норма прироста продукта - произведение нормы капитальных вложений на эффективность вложений.

2. Показатели производительности всех видов ресурсов (таблица).

Таблица

Показатели оценки аллокативной эффективности ресурсов

Показатели	Y	L	K	W	P	IT	I	N	Z_I	Z_{RI}
Y	-	$\frac{L}{Y}$	$\frac{K}{Y}$	$\frac{W}{Y}$	$\frac{P}{Y}$	$\frac{IT}{Y}$	$\frac{I}{Y}$	$\frac{N}{Y}$	$\frac{Z_I}{Y}$	$\frac{Z_{RI}}{Y}$
L	$\frac{Y}{L}$	-	$\frac{K}{L}$	$\frac{W}{L}$	$\frac{P}{L}$	$\frac{IT}{L}$	$\frac{I}{L}$	$\frac{N}{L}$	$\frac{Z_I}{L}$	$\frac{Z_{RI}}{L}$
K	$\frac{Y}{K}$	$\frac{L}{K}$	-	$\frac{W}{K}$	$\frac{P}{K}$	$\frac{IT}{K}$	$\frac{I}{K}$	$\frac{N}{K}$	$\frac{Z_I}{K}$	$\frac{Z_{RI}}{K}$
W	$\frac{Y}{W}$	$\frac{L}{W}$	$\frac{K}{W}$	-	$\frac{P}{W}$	$\frac{IT}{W}$	$\frac{I}{W}$	$\frac{N}{W}$	$\frac{Z_I}{W}$	$\frac{Z_{RI}}{W}$
P	$\frac{Y}{P}$	$\frac{L}{P}$	$\frac{K}{P}$	$\frac{W}{P}$	-	$\frac{IT}{P}$	$\frac{I}{P}$	$\frac{N}{P}$	$\frac{Z_I}{P}$	$\frac{Z_{RI}}{P}$
IT	$\frac{Y}{IT}$	$\frac{L}{IT}$	$\frac{K}{IT}$	$\frac{W}{IT}$	$\frac{P}{IT}$	-	$\frac{I}{IT}$	$\frac{N}{IT}$	$\frac{Z_I}{IT}$	$\frac{Z_{RI}}{IT}$
I	$\frac{Y}{I}$	$\frac{L}{I}$	$\frac{K}{I}$	$\frac{W}{I}$	$\frac{P}{I}$	$\frac{IT}{I}$	-	$\frac{N}{I}$	$\frac{Z_I}{I}$	$\frac{Z_{RI}}{I}$
N	$\frac{Y}{N}$	$\frac{L}{N}$	$\frac{K}{N}$	$\frac{W}{N}$	$\frac{P}{N}$	$\frac{IT}{N}$	$\frac{I}{N}$	-	$\frac{Z_I}{N}$	$\frac{Z_{RI}}{N}$
Z_I	$\frac{Y}{Z_I}$	$\frac{L}{Z_I}$	$\frac{K}{Z_I}$	$\frac{W}{Z_I}$	$\frac{P}{Z_I}$	$\frac{IT}{Z_I}$	$\frac{I}{Z_I}$	$\frac{N}{Z_I}$	-	$\frac{Z_{RI}}{Z_I}$
Z_{RI}	$\frac{Y}{Z_{RI}}$	$\frac{L}{Z_{RI}}$	$\frac{K}{Z_{RI}}$	$\frac{W}{Z_{RI}}$	$\frac{P}{Z_{RI}}$	$\frac{IT}{Z_{RI}}$	$\frac{I}{Z_{RI}}$	$\frac{N}{Z_{RI}}$	$\frac{Z_I}{Z_{RI}}$	-

В таблице используются следующие обозначения: Y - национальный продукт; K - капитал; L - труд; W - заработная плата (фонд заработной платы); P - добавленная стоимость; IT - информационный или технологический капитал; I - капиталовложения (инвестиции); N - численность занятых; Z_I, Z_{RI} - информационные издержки при работе с любой информацией и при получении технологически значимой (релевантной) информации.

Выделив интенсивные и экстенсивные факторы развития экономической системы, на основе факторного анализа и эмпирических данных можно построить диаграмму сочетаемости этих факторов в динамике (во времени).

С макроэкономической точки зрения аллокативность системы (K_A) можно оценить по коэффициенту соотношения долей интенсивных (D_I) и экстенсивных (D_E) факторов. Естественно, что чем больше интенсивных факторов используется в системе, тем больше ее общая эффективность.

Аллокативная эффективность факторов производства находит свое отражение в методиках расчета экономического роста, особенно в так называемых производственных функциях.

Второй вид эффективности системы - это адаптивная (институциональная) эффективность. В словаре Райзберга [15] приведено следующее определение понятия «адаптация»: «Адаптация - приспособление экономической системы и ее отдельных субъектов, работников, к изменяющимся условиям внешней среды, производства, труда, обмена, жизни». Адаптивность, согласно этому же экономическому словарю, представляет собой «способность системы, организации или отдельного человека приспосабливаться к различным условиям окружающей среды». Таким образом, адаптивная эффективность системы - результативность приспособления системы к различному окружению.

Концепция адаптивной эффективности впервые была сформулирована Дугласом Нортом. В своей лекции в честь получения Нобелевской премии он так соотносит аллокативную и адаптивную эффективность: «Ключ к долговременному росту - обеспечение адаптационной, а не аллокационной эффективности» [16].

При этом Норт, с одной стороны, трактует адаптивную эффективность как «состояние, при котором при заданных состоянии технологий и издержках на информацию рынок имеет наименьшие возможные себестоимость производства и трансакционные издержки». В этой трактовке Норт близок к Р. Коузу, О. Уильямсону и другим институционалистам, которые говорили о необходимости снижения трансакционных издержек в аспекте достижения эффективности.

С другой стороны, Норт определяет адаптивную эффективность как «способность некоторых обществ справляться с потрясениями, гибко приспосабливаясь к ним, и формировать институты, которые эффективно работают с измененной «реальностью», а рост предельной эффективности связывает с взаимным влиянием институтов. Тем самым видно отличие аллокативной эффективности от адаптивной эффективности: последнюю нельзя напрямую измерить величиной издержек, она отражает степень соответствия институтов определенным принципам. Норт предлагает 4 основных рецепта, направления развития экономической системы для достижения адаптивной эффективности. Первый рецепт содержит рекомендацию установления «надежных пределов, ограничивающих полномочия должностных лиц». Во втором содержится определение удачного государственного устройства, согласно которому необходимо ограничивать политические установки, «наделяя граждан правами и устанавливая другие пределы для принятия решений правительством» [16]. Третий принцип говорит о необходимости установления личных прав и прав

собственности, а четвертый посвящен обязанностям государства защищать и соблюдать права граждан. Соблюдение данных принципов позволит повысить «гибкость институциональной матрицы», однако более детальных рекомендаций Норт не дает: «Мы еще далеки от понимания того, как создать адаптивно эффективную экономику, потому что эффективность распределения ресурсов и адаптивная эффективность не всегда совпадают друг с другом» [16].

Концепция адаптивной эффективности согласно Норту, на взгляд автора, должна быть дополнена показателями, помогающими измерить адаптивную эффективность. Несмотря на то что в 1986 году Д. Нортом и Дж. Уоллисом был измерен трансакционный сектор экономики, непосредственно трансакционные издержки на макроуровне и адаптивная эффективность так и не были рассчитаны.

Представляется интересной концепция дисфункции экономических систем и институтов О.С. Сухарева. Согласно данной концепции, адаптивная эффективность - явление, противоположное дисфункции. Дисфункция представляет собой нарушение, расстройство функций какого-либо органа, системы, экономического института, преимущественно качественного характера – по аналогии с дисфункцией организма в биологии [17]. Применение термина «дисфункция» для описания адаптивной эффективности или неэффективности системы представляется очень логичным, поскольку благодаря параллели с биологической дисфункцией термин становится легким для понимания и объяснения.

Институты можно охарактеризовать семью основными параметрами: целью существования, областью приложения, функциональным наполнением, периодом времени до изменения, издержками функционирования, степенью отторжения или принятия вводимой нормы, устойчивостью к мутации (мера устойчивости института к его преобразованию в какую-либо другую форму) [14, с.280]. Изменение каждой из этих характеристик может приводить к негативным или позитивным последствиям. В верхней точке адаптивной эффективности цель существования института обозначена и долгосрочна, взаимосвязана с другими целями, область приложения - стабильна, функциональное наполнение - высокое при строго определённом наборе функций, срок до изменения нормы - значительный, издержки действия - приемлемые и относительно невысокие, степень отторжения - низкая, устойчивость к случайному изменению (мутации) - высокая [18].

Адаптивная эффективность применительно к промышленной системе будет возникать, если цель существования логично обоснована, взаимоувязана с целями других систем, не мешает ее развитию и не наносит ущерба как в краткосрочном, так и в долгосрочном периоде; область приложения является стабильной и устойчивой; функции являются четко определенными, хорошо сформулированными, взаимоувязанными по целям и задачам, не дублирующими друг друга; период времени до изменения значительный, но быстрое реагирование отдельных подсистем на изменение условий вполне возможно; издержки функционирования - минимально возможные; степень отторжения низкая, а устойчивость к случайным изменениям высокая. В более конкретном изложении это означает, что промышленность должна соответствовать целям национальной безопасности и развития страны, предоставлять людям рабочие места в соответствии с полученным образованием, давать возможность населению удовлетворять свои покупательские ожидания за счет приобретения товаров, быстро и адекватно реагировать на различные изменения и ситуации риска без потери своих качеств, использовать ресурсы максимально эффективно с минимально возможными обоснованными затратами, применяя достижения науки и техники, имея высокую восприимчивость к инновациям, являясь одним из основных драйверов экономического роста страны.

Синергетическая эффективность представляет собой, согласно Б.Л. Кузнецову, степень отклонения линейной интегральной эффективности от эффективности, определяемой их алгебраической суммой [19]. О.С. Сухарев представляет синергетическую эффективность как способ учета общей эффективности, складывающейся из различных видов эффективности, когда невозможно просуммировать разные эффективности или перемножить их [20].

В начале XXI века в экономической науке, особенно российской, появилось значительное число исследований, авторы которых определяют синергетическую эффективность тем или иным способом. В основном все предлагаемые подходы базируются на трех возможных методах определения стоимости компаний - затратном, доходном и рыночных сравнений, причем последний имеет две разновидности: по реальной рыночной стоимости акций фирмы и по аналоговой стоимости. И. Ансофф в работе «Новая корпоративная стратегия» предлагает проводить оценку синергетической эффективности как оценку сокращения затрат при совместном ведении операций при данном уровне дохода либо как оценку увеличения прибыли при данном уровне инвестиций [21].

При этом для построения интегрального показателя синергетической эффективности могут применяться и традиционные методы оценки аллокативной эффективности, такие как экономическая добавленная стоимость (EVA), полная стоимость владения (Total Cost of Ownership, TCO), совокупный экономический эффект (Total Economic Impact, TEI), система сбалансированных показателей (BSQ), управление портфелем активов (Portfolio Management), и вероятностные методы оценки рентабельности и риска, в том числе методы опционов (Real Option Valuation, ROV), арбитражные методы (Arbitrage Pricing Theory, APT) и модель оценки финансовых активов (Capital Asset Pricing Model, CAPM).

Ряд авторов предлагают использовать оценку влияния внешней среды. Например, для оценки синергетической эффективности существует метод определения активности системы (АС), позволяющий оценить синергетический эффект от влияния каждого из факторов внешней и внутренней среды на деятельность хозяйствующего субъекта и использовать этот показатель в синергетической модели для разработки среднесрочного прогноза социально-экономического развития систем различного иерархического уровня. Однако общим недостатком таких методов является нелогичность применения тех или иных показателей в качестве определяющих, а также применения тех или иных весовых коэффициентов. Сведем рассмотренные нами показатели эффективности в единую схему экономической эффективности системы (рисунок).

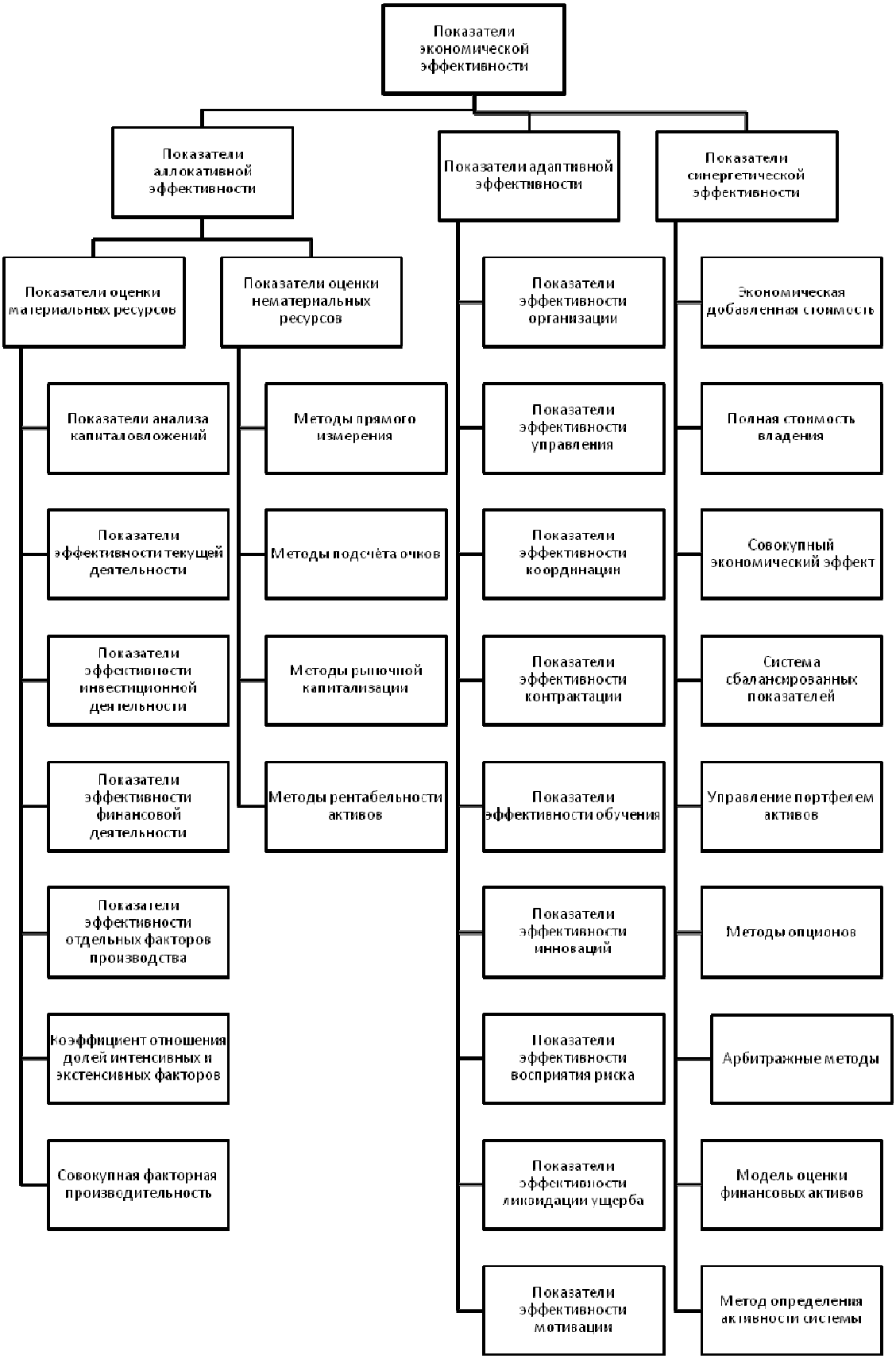


Рис. Показатели оценки экономической эффективности системы

По мнению автора, оценка эффективности системы и использования ресурсов должна базироваться на определенных критериях. Несмотря на несомненную привлекательность синергетических показателей, выделение нелинейной состав-

ляющей взаимодействия элементов на практике оказывается достаточно сложной задачей. Поэтому в процессе исследования необходимо выбрать группу показателей, основными из которых должны быть показатели аллокативной эффективности, а также ряд показателей адаптивной эффективности, выделяемых в зависимости от конкретных целей анализа. Для исследования промышленной системы разумным представляется использование коэффициента соотношения интенсивных и экстенсивных факторов, показателей эффективности отдельных факторов производства, а также ряда показателей, характеризующих стабильность, надежность, адаптивность и соответствие структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов, Е.В. Классификация миниэкономических теорий / Е.В. Попов // Труды Всероссийского симпозиума по мини-экономике. Пленарные доклады. — Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2002. - С.75.
2. Бусыгин, В.П. Микроэкономика: третий уровень: учебник: в 2 т. / В.П. Бусыгин, Е. В. Желободько, А. А.Цыплаков. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.-Т.1. - 525 с.
3. Коуз, Р.Фирма, рынок и право: [пер. с англ.] /Р.Коуз. - М.: Новое издательство, 2007. - 224 с. - (Библиотека фонда «Либеральная миссия»).
4. Клейнер, Г.Б. Теории предприятия: спрос, предложение, рынок / Г.Б. Клейнер // Труды Всероссийского симпозиума по экономической теории. Пленарные доклады. - Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2003. - С. 2 - 11.
5. Словарь современной экономической теории Макмиллана. - М.: Инфра-М, 2003. - 608 с.
6. Сухарев, О.С. Теория эффективности экономики / О.С. Сухарев. – М.: Финансы и статистика, 2010. – 368 с.
7. Farrell, M. J. The measurement of Productive Efficiency / M.J. Farrell // Journal of Royal Statistical Society. – 1957. – V. 120. - Part III.
8. Ширяев, И.М. Типологизация подходов к определению эффективности экономических институтов /И.М. Ширяев// Journal of Institutional Studies (Журнал институциональных исследований). - 2014 - Т. 6. - № 2. – С.91 - 109.
9. Стрижакова, Е.Н. Проблема экономического развития и представления об «экономике счастья»: вопрос измерения и оценки /Е.Н. Стрижакова// Менеджмент в России и за рубежом. - 2014. - №1. - С. 44-51.
10. Еленева, Ю.А. Экономика машиностроительного производства: учеб. для вузов / Ю. А. Еленева. - 3-е изд., перераб. - М.: Академия, 2010. - 254 с.
11. Стрижакова, Е.Н. Производительность труда в промышленности: факторы роста, резервы и модели /Е.Н. Стрижакова // Экономика и предпринимательство. - 2014. - № 11-4. - С. 493-497.
12. Курочкин, В.Н. Организация, нормирование и оплата труда / В. Н. Курочкин. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2014. – 234 с.
13. Коршунов, В.В. Экономика организации (предприятия). Теория и практика: учебник / В.В. Коршунов. - М.: Юрайт, 2014. - 433 с.
14. Сухарев, О.С. Эволюционная экономика / О.С. Сухарев. - М.: Финансы и статистика, 2012. - 800 с.
15. Райзберг, Б.А. Современный экономический словарь / Б.А.Райзберг, Л.Ш. Лозовский, Е.Б.Стародубцева. - М.: Инфра-М, 2006. - С. 6.
16. Норт, Д. Понимание процесса экономических изменений / Д. Норт; пер. с англ. К. Мартынова, Н.Эдельмана; Гос. ун-т - Высшая школа экономики. - М.: Изд. дом ГУ - ВШЭ, 2010. - 256 с. - (Экономическая теория).
17. Сухарев, О.С. Теория дисфункции институтов и экономических систем (к 15-летию разработки данной теории в России) / О.С. Сухарев // Журнал экономической теории. - 2014. - № 1.
18. Сухарев, О.С. Экономическая психология как фундамент современной экономической науки / О.С. Сухарев // Экономика и предпринимательство. - 2013. - №3. - С. 14 - 27.
19. Кузнецов, Б.Л. Эффективность производственных систем / Б.Л. Кузнецов // Экономическая синергетика: инновационное развитие России. - Наб. Челны: Изд-во КамПИ, 2006. - 399 с.
20. Сухарев, О.С. Институциональная теория и экономическая политика / О.С. Сухарев. - М.: Экономика, 2007. - 1328 с.
21. Ансофф, И. Новая корпоративная стратегия / И.Ансофф. - СПб.: Питер Ком, 1999. - 416 с. - (Серия «Теория и практика менеджмента»).

1. Popov, E.V. Mini-economic theories classification / E.V. Popov // Proceedings of All-Russian Symposium on Mini-Economic. Plenary Reports. — Ekaterinburg: Institute of Economics of UrB RAS, 2002. – pp. 75.
2. Busygin, V.P. Microeconomics: the Third Level: Textbook: in 2 Vol. / V.P. Busygin, E.V. Zheloborodko, A. A.Tsyplakov. - Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2008.- Vol.1. – pp. 525.
3. Kous, R. Company, Market and Law: [transl. from Engl.] /R. Kous. - M.: New Publishing House, 2007. – pp. 224. - (Library of "Liberal Mission" Foundation).
4. Kleiner, G.B. Company theory: demand, supply, market / G.B. Kleiner // Proceedings of All-Russian Symposium on Economic Theory. Plenary Reports. - Ekaterinburg: Institute of Economics UrB RAS, 2003. - pp. 2 - 11.
5. Dictionary of Macmillan Modern Economic Theory. - M.: Infra-M, 2003. – pp. 608.
6. Sukharev, O.S. Economy Efficiency Theory / O.S. Sukhrev. – M.: Finances & Statistics, 2010. – pp. 368.
7. Farrell, M. J. The measurement of Productive Efficiency / M.J. Farrell // Journal of Royal Statistical Society. – 1957. – V. 120. - Part III.
8. Shiryaev, I.M. Typology of approaches to definition of economic institutes efficiency /I.M. Shiryaev// Journal of Institutional Studies). - 2014 - Vol. 6. - № 2. – pp.91 - 109.
9. Strizhakova, E.N. Problem of economic development and "economical fortune": problem of measurement and estimate /E.N. Strizhakova// Management in Russia and Abroad. - 2014. - №1. - pp. 44-51.
10. Yeleneva, Yu.A. Mechanical Engineering Economy: College textbook / Yu. A. Yeleneva. - 3-d Ed. revised. - M.: Academy, 2010. – pp. 254.
11. Strizhakova, E.N. Labour productivity in industry: factors of growth, reserves and patterns / E.N. Strizhakova // Economy and Business Undertakings. - 2014. - № 11-4. - pp. 493-497.
12. Kurochkin, V.N. Organization, Norm-Setting and Remuneration of Labour / V.N. Kurochkin. – M.-Berlin: Direkt-Media, 2014. – pp. 234.
13. Korshunov, V.V. Company (Plant) Economy. Theory and Practice: Text- book / V.V. Korshunov. - M.: Ureight, 2014. – pp. 433.
14. Sukharev, O.S. Evolution economy / O.S. Sukha- rev. - M.: Finances and Statistics, 2012. – pp. 800.
15. Reisberg, B.A. Modern Economic Dictionary / B.A. Reisberg, L.Sh. Lozovsky, E.B. Starodubtseva. - M.: Infra-M, 2006. - pp. 6.
16. Nort, D. Ponimaniye of process of economic changes / D. Nort; the lane with English K. Martyno-va, N. Edelman; State. un-t - Higher School of Economics. - M.: Prod. the house of GU - HSE, 2010. - 256 pp.
17. Sukharev, O. S. The theory of dysfunction of institutes and economic systems (to the 15 anniversary of development of this theory in Russia) / O. S. Sukharev//the Magazine of the economic theory. - 2014. - No. 1.
18. Sukharev, O. S. Ekonomicheskaya psychology as base of modern economic science / O. S. Sukharev//Economy and entrepreneurship. - 2013. - No. 3. – P. 14 - 27.
19. Smiths, B. L. Effektivnost of production systems / B. L. Kuznetsov//Economic synergetrics: innovative development of Russia. - Chelny Emb.: Publishing house of KAMPI, 2006. - 399 pp.
20. Sukharev, O. S. Institutional theory and economic policy / O. S. Sukharev. - M.: Economy, 2007. - 1328 pp.
21. Ansoff, And. New corporate strategy(strategies). Ansoff. - SPb.: Peter Côme, 1999. - 416 pp.

Статья поступила в редколлегию 23.11.2015.
Рецензент: к.э.н., профессор Брянского государственного технического университета Ерохин Д.В.

Сведения об авторах:

Стрижакова Екатерина Никитична, к. э. н., доцент кафедры «Экономика и менеджмент» Брянского государственного технического университета, e-mail: kathystr@inbox.ru.

Strizhakova Catherine Nikitichna, Can.Ec., Assistant Prof. of the Dep. "Economy & Management" Bryansk State Technical University, e-mail kathystr@inbox.ru.

УДК 001.3

В.В. Рогалев, Е.В. Дмитриевский

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ПРОФЕССОРА, ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК В.В. ЕВЕНКО

30 апреля 2016 г. исполняется 100 лет со дня рождения профессора, доктора технических наук, выдающегося ученого-теплотехника Владимира Иосифовича Евенко.

Владимир Иосифович родился в селе Кочуново Нижегородской области. После окончания МВТУ им. Н.Э. Баумана по специальности «Паровозостроение» он был направлен на Коломенский паровозостроительный завод им. В.В. Куйбышева, где с 1938 по 1941 г. работал в качестве инженера-конструктора I категории и старшего конструктора ОЛКБ.

С 1941 по 1946 г. в связи с эвакуацией Коломенского паровозостроительного завода работал в г. Красноярске на предприятиях «Завод №4 им. Ворошилова», «Красноярский паровозостроительный завод» в должностях руководителя группы ОГК, начальника бюро ОГК, заместителя начальника паровозного цеха.

В 1946 г. по указанию министерства был переведен из Красноярска на Коломенский паровозостроительный завод им. В.В. Куйбышева, где продолжил работу в качестве заместителя главного конструктора и начальника тепловозного отдела.

В 1952 г. В.И. Евенко зачислен исполняющим обязанности доцента на кафедру «Паровозостроение» Бежицкого института транспортного машиностроения (с 1956 г. Брянский институт транспортного машиностроения), а в 1953 г. утвержден в этой должности. В этом же году он получил ученое звание доцента. В 1958 г. переведен на должность доцента кафедры «Локомотивостроение». В 1963 г. он стал заведующим кафедрой «Теплотехника», а в 1969 г. был назначен профессором кафедры «Теплотехника».

В 1972 г. В.И. Евенко защищает в МИИТе диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Исследование и выбор оптимальных поверхностей теплообмена для охлаждающих устройств тепловозов».

Под руководством доктора технических наук В.И. Евенко произошло становление кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» как отдельного подразделения БИТМа. В 1959 г. на Брянском машиностроительном заводе (БМЗ) началось изготовление мощных судовых малооборотных дизелей. Для освоения производства такой сложной продукции потребовались высококвалифицированные специалисты в области двигателестроения. Поэтому приказом № 45 Министерства высшего образования СССР от 18 января 1957 г. в составе Брянского института транспортного машиностроения (БИТМ) на вечернем факультете при кафедре «Локомотивостроение» была открыта специальность «Двигатели внутреннего сгорания». В связи с интенсивным развитием дизельного производства на БМЗ в 1973 г. по ходатайству областной администрации и решению Министерства высшего образования в БИТМе была открыта кафедра «Двигатели внутреннего сгорания». Первым заведующим кафедрой стал Владимир Иосифович Евенко. Он руководил кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» в течение первых 10 лет её существования (с 1973 по 1983 г.), под его руководством сформи-

ровался высококвалифицированный коллектив преподавателей. За годы существования специальности и кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» на дневном, вечернем и заочном отделениях подготовлен большой отряд квалифицированных специалистов. Только по дневной форме обучения выпущено свыше 1500 инженеров-механиков специальности «Двигатели внутреннего сгорания», около 30 выпускников защитили кандидатские диссертации. С момента организации кафедра, наряду с учебным процессом, под руководством В.И. Евенко выполняла научно-исследовательские работы в области двигателестроения для заводов отрасли: Брянского машиностроительного, Брянского автомобильного, Коломенского тепловозостроительного, Свердловского турбомоторного, Харьковского им. Малышева и др.

С 1984 по 1998 г. В.И. Евенко являлся заведующим кафедрой «Теплотехника», профессором кафедры «Промышленная теплоэнергетика».

В.И. Евенко – автор свыше 300 научных трудов, 30 изобретений. Его первая статья вышла в 1939 г., а последняя – в 2008 г. Труды В.И. Евенко заслуженно вошли в российскую научную школу теплоэнергетики и заслужили признание как в СССР, так и за рубежом. Многие из этих трудов используются студентами в качестве учебных пособий. Большое количество учебников переведены на иностранные языки, а книга «Теория и расчет паровоза» в 50-х годах прошлого столетия стала бестселлером в Китае.

Существенный вклад В.И. Евенко внёс в подготовку научных кадров. Под его научным руководством защитили диссертации более 20 кандидатов технических наук, некоторые из которых стали преподавателями нашего университета: Соченов В.Н., Анисин А.К., Кондаков С.А., Шишков В.М., Храпов Б.И., Александров Н.А.

За заслуги перед отечеством, большой вклад в развитие народного хозяйства, научно-педагогическую деятельность и успешное выполнение важнейших производственных, учебных и общественных задач В.И. Евенко награжден девятью медалями, знаками «Отличник соцсоревнования Минтрансмаша» (1948 г.), «За отличные успехи в работе в области высшего образования СССР» (1973, 1980 гг.), «Победитель социалистического соревнования» (1974, 1978 гг.), почётными грамотами Министерства тяжёлого, энергетического и транспортного машиностроения СССР (1979 г.), Президиума Верховного Совета РСФСР (1986 г.), многочисленными благодарностями и грамотами.

Большую научную и педагогическую работу В.И. Евенко сочетал с общественной деятельностью: был членом Совета по локомотивам Научно-технического совета Министерства высшего и среднего специального образования, с 1957 по 1958 г. работал ученым секретарем технико-экономического совета Брянского совнархоза.

Владимир Иосифович достойно воспитал двоих детей. Его сын, Владимир Владимирович, – кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика и менеджмент» Брянского государственного технического университета. Дочь, Ольга Владимировна, – талантливый художник, участница многочисленных художественных выставок.

Преподаватели и сотрудники кафедр «Тепловые двигатели», «Промышленная теплоэнергетика» и весь коллектив БГТУ высоко ценят богатое творческое наследие Владимира Иосифовича Евенко. Все, кто контактировал с Владимиром Иосифовичем, отмечали его обширные энциклопедические знания, оптимизм, доброжелательность и неиссякаемую творческую энергию.

ПРАВИЛА
направления, рецензирования и опубликования научных статей
в журнал «Вестник Брянского государственного технического университета»

1. К публикации принимаются научные и научно-технические статьи, отражающие результаты исследований, проведенных автором (авторами), научные обзоры, итоговые материалы научных мероприятий (симпозиумов, конференций, семинаров и т.д.), которые должны соответствовать тематике журнала.
2. Авторы должны предоставлять оригинальные работы, содержащие достоверные результаты проделанной научной работы. При использовании текстовой или графической информации, заимствованной из работ других лиц, необходимы ссылки на соответствующие публикации. Если элементы рукописи ранее уже были опубликованы, то авторам необходимо сослаться на более раннюю работу, указав отличие новой работы от предыдущей.
3. Подача статьи в более чем один журнал является неприемлемой и расценивается как неэтичное поведение авторов.
4. Для публикации статьи в журнале в редакцию представляются в электронном виде:
   – текст статьи с подписями всех авторов (файл с расширением .pdf);
   – текст статьи (файл с разрешением .doc; Word-2003);
   – рецензия-рекомендация доктора наук с подписью рецензента и печатью организации, в которой он работает (файл с расширением .pdf);
   – экспертное заключение о возможности опубликования материалов статьи в открытой печати (файл с расширением .pdf);
   – письменная рекомендация научного руководителя (для аспирантов, магистрантов и студентов) (файл с расширением .pdf);
   – пакет рисунков и иллюстраций (файлы tiff, jpg с расширением растровых иллюстраций не ниже 300 dpi).

Текст статьи должен быть вычитан автором.
5. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. В качестве рецензентов могут быть привлечены члены редакционного совета журнала, обладающие профессиональными знаниями и опытом работы по научному направлению, близкому к теме рукописи авторов. Рекомендации рецензентов являются основанием для принятия решения о публикации статьи. Специалисты, работающие в той же организации, в которой работает и автор (авторы) статьи, не могут выступать в качестве рецензентов. Срок рецензирования - не более 10 дней со дня поступления статьи в редакцию журнала. При наличии рекомендации статьи к доработке или отказе в публикации автору высылается копия рецензии. Рецензии на статьи хранятся в редакции не более 3 лет.
6. Файлы, представляемые в редакцию, должны быть названы по фамилии первого автора (например: Ivanov_I.I.).
7. Объём статьи - 5-10 страниц формата А4 (режим автоматической расстановки переносов), включая графики, рисунки, таблицы и список литературы.
8. Текст статьи печатается через 1 интервал и должен содержать:

– в левом верхнем углу - УДК (высота букв - 12 пт.);
– справа – инициалы, фамилию автора (авторов) через запятую (высота букв - 12 пт.);
– название статьи (высота прописных букв - 14 пт., шрифт жирный, выравнивание по центру);
– аннотацию (4 – 6 строк; высота букв - 10 пт.; абзац - 7 мм; распределение текста по двум колонкам);
– ключевые слова (6 – 8 слов; высота букв - 10 пт.; абзац - 7 мм; распределение текста по двум колонкам);
– текст статьи (высота букв - 12 пт.; абзац – 10 мм; поля: слева, справа, сверху и снизу – 20 мм);

– список литературы (высота букв - 10 пт., заголовок – прописными буквами);

– сведения об авторах: Ф.И.О. (полностью), ученую степень, ученое звание, должность, место работы, рабочий и домашний телефоны, e-mail (высота букв - 10 пт., заголовок – прописными буквами, выравнивание по правому краю);

– реферат (высота букв - 10 пт.; абзац - 7 мм; распределение текста по двум колонкам).

Ссылку на гранты размещают в конце текста статьи (после раздела «Заключение»).

9. Заглавие статьи должно быть информативным, четко отражать ее содержание в нескольких словах (преимущественно ключевых). Аннотация дает возможность установить основное содержание статьи, определить его релевантность и следует ли читателю обратиться к полному тексту статьи (одним из вариантов построения аннотации является краткое повторение структуры статьи, включающей цели, задачи, методы и результаты). Реферат переводится в редакции журнала на английский язык и имеет целью информировать зарубежного читателя о содержании статьи. Он должен быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не дублировать полученные и опубликованные ранее результаты), содержательным (отражать цель, методы, ход проведенного исследования, результаты, краткие выводы работы), структурированным (следовать логике описания результатов статьи) и компактным (15 – 20 строк).

10. Текст статьи должен быть структурирован. Введение содержит реферативное изложение постановки задачи и возможного применения результатов на практике. Основная часть должна иметь несколько внутренних разделов (с подзаголовками) и содержать формализованную постановку задачи и предлагаемый метод ее решения; отличие предлагаемой постановки задачи от уже известных; преимущество развиваемого метода по сравнению с существующими (содержать пример, подтверждающий работоспособность и эффективность предлагаемого решения). Завершить статью должно содержательное обсуждение (заключение) полученных результатов.

11. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского и греческого алфавитов), цифры, знаки должны быть четкими, различимыми. Все латинские буквы набираются курсивом, все русские и греческие – прямо. Формулы должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0 (версия Word-2003) размером 12 пт.

12. Рисунки, графики, диаграммы, схемы, таблицы и др. графические материалы размещаются внутри текста (после их упоминания) и должны иметь подрисуночные подписи (высота букв - 10 пт., выравнивание по центру), а таблицы – заголовок. Формат обтекания рисунков - «вокруг рамки». На рисунках надписи пишутся прямо, с заглавной буквы, шрифт - Times, высота букв – 10 пт. Формулы должны быть набраны в редакторе, совместимом с MS Word 2010.

13. Список литературы оформляется по ГОСТ 7.1 – 2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание», не должен превышать 10 наименований изданий, напечатанных не ранее 1970 г.

14. Единицы измерения всех физических величин приводятся в СИ.

15. Редакционная коллегия проводит экспертизу комплектности представленных документов (в соответствии с п. 4), анализирует текст статьи на наличие заимствований с использованием системы «Антиплагиат» и рецензирует статьи, используя критерии актуальности, научной новизны, информативности, соответствия основным научно-техническим направлениям журнала.

16. Если статья по рекомендации редакционного совета возвращается на доработку (до 7 рабочих дней), то в журнале указывается дата поступления исправленного текста.

17. Авторам статей гонорар не выплачивается.

18. Статьи, не соответствующие тематике научно-технического журнала и не отвечающие настоящим требованиям, а также представленные с нарушением комплектности, к рассмотрению не принимаются. Рукописи авторам не возвращаются. Редакция не несёт обязательств по рецензированию всех поступающих материалов и не вступает в дискуссию с авторами отклоненных рукописей.

В Е С Т Н И К
БРЯНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Литературный редактор М.Л.Щербакова
Корректоры В.А.Ерохина, М.Л.Щербакова
Компьютерная верстка В.А.Ерохина

Подписано в печать 20.06.16. Дата выхода в свет 30.06.16. Формат 60x84 1/8.
Бумага офсетная. Офсетная печать. Усл. печ. л. 24,8. Уч.-изд. л. 24,8.
Тираж 500 экз. Свободная цена. Заказ 72

Адрес редакции и издателя: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», 241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7, БГТУ, тел. +7 (4832) 58 82 77.
Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии БГТУ, 241035, Брянск, ул. Институтская, 16.