

Редакционный совет

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф., председатель
Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф., зам. председателя
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц.
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.
Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф.
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.
Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф.
Попова Л.В. д-р экон. наук, проф.
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

Редаклегия

Главный редактор
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации

Заместители главного редактора

Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Члены редаклегии

Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф.
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф.
Дмитриев А.М. д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф.
Зубарев Ю.М. д-р техн. наук, проф.
Зубачинов В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Иванов Б.Р. д-р техн. наук, проф.
Колесников К.С. д-р техн. наук, проф., академик РАН
Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф.
Корнидов С.Ф. д-р техн. наук, проф.
Малинин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф.
Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф.
Панин В.Е. д-р техн. наук, проф., академик РАН

Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф.
Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф.

Ответственный за выпуск

Морозова А.В.

Адрес редаклегии

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,
41-98-03

www.ostu.ru

E-mail: mct_lit@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство: ПИ № ФС77-35719 от 24 марта 2009 года

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу «Пресса России»

© ОрелГТУ, 2010

Содержание

Машиностроительные технологии и инструменты

Базин С.А., Марков В.В. Метод «Всеобщее обслуживание оборудования» и области его применения в машиностроении	7
Болдырев А.И., Сухочев Г.А. Комбинированные методы формирования поверхностей каналов в труднообрабатываемых материалах	13
Киричек А.В., Селеменов М.Ф., Семенкин Г.Н., Осипова А.Ф. Принципы применения эпиламированного инструмента при дорновании	20
Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Оптимизация выбора режущего инструмента на основе методов сравнительного анализа	23
Стеблецов Ю.Н., Тарапанов А.С. Определение сил резания процесса нарезания зубчатых колес передачи новикова червячными фрезами	31
Шушиков И.Л., Бишутин С.Г. Оборудование для обработки и качество протяженных цилиндрических поверхностей после ленточного шлифования	35

Конструирование, расчеты, материалы

Вайнер Л.Г. Влияние кинематики процесса двустороннего шлифования торцов деталей на точность обработки	41
Горленко А.О., Ерохин А.Н. Триботехнические испытания подшипников скольжения	46
Копылов В.И., Ануфриев В.И., Ануфриев С.В., Куренев А.Б. Устройство для установки стеновых панелей в проектное положение	49
Матлахов В.П. Модернизация машины трения МИ-1М для испытаний в условиях смазывания абразивно-масляной смесью	53
Никишин В.Н. Волошко В.В., Фокин Р.А. Проблема бесступенчатого трансформатора вращающего момента механического типа	58
Плешаков В.В., Албагачиев Д.А. Упрочнение деталей машин поверхностным пластическим деформированием	61
Прудников М.И. Технологическое обеспечение триботехнических свойств поверхностей	65

Моделирование технологических процессов

Анцев В.Ю., Толоконников А.С., Калабин П.Ю. Моделирование предельного состояния металлоконструкций мостовых кранов с оптимизацией размеров поперечных сечений	71
Горленко А.О., Ключников М.Л. Метод определения влияния пластичных смазочных материалов на износостойкость деталей машин	75
Игнатов П.В. Объемное компьютерное моделирование пресс-форм в области его применения в инструментальном производстве	79
Леоненко Н.А., Ванина Е.А., Гальнов А.А., Капустина Г.Г., Швец Н.Л. Воздействие лазерного излучения на золотосодержащие дисперсные среды и моделирование температурного поля процесса лазерной агломерации	83
Кошкин А.А., Шакирова Н.Ю. Модель температурного поля в зоне шлифования металлополимерных композитов	91

Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

Анцифорова Е.В., Пахолкин Е.В. Трибомониторинг процессов модифицирования рабочих поверхностей узлов трения ремонтно-восстановительными составами: аналитический обзор	95
Киричек А.В., Морозова А.В. Комплексная оценка качества подготовки специалистов в области конструкторско-технологической подготовки производства	101
Мишин В.В., Подмастерьев К.В., Семенов В.В., Майоров М.В., Чернышов В.Н., Сельхов А.В., Шаталов К.В. Исследование работы подшипника по параметрам его электрического сопротивления	108
Протасьев В.Б., Косаревская А.В., Разумов-Раздолов К.Л. Формирование экспертных оценок при разработке управленческих решений	116
Халитов Т.Ф., Закирничная М.М. Детектирование усталостной поперечной трещины на валу роторной системы на основе модального анализа и виброакустической диагностики	124

Editorial council

Golenkov V.A. *Doc. Sc. Tech., Prof., president*
Radchenko S.Y. *Doc. Sc. Tech., Prof., vice-president*
Borzenkov M.I. *Candidat Sc. Tech., Assistant Prof.*
Astafichev P.A. *Doc. Sc. Law., Prof.*
Ivanova T.I. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Kolchunov V.I. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Popova L.V. *Doc. Sc. Ec., Prof.*
Stepanov Y.S. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Konstantinov I.S. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Editorial Committee

Editor-in-chief
Stepanov Y.S. *Doc. Sc. Tech., Prof., honored worker of science of Russian Federation*

Editor-in-chief Assistants

Gordon V.A. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Kirichek A.V. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Podmasteriev K.V. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Member of editorial board

Babichev A.P. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Vdovin S.I. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Dmitriev A.M. *Doc. Sc. Tech., Prof., Corresponding Member of RAS*
Emelyanov S.G. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Zubarev Y.M. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Subchaninov V.G. *Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.*
Ivanov B.R. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Kolesnikov K.S. *Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS*
Korndorf S.F. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Malinin V.G. *Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.*
Mulyukin O.P. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Osadchy V.Ya. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Panin V.E. *Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS*
Raspopov V.Ya. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Smolenzev V.P. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Responsible for edition

Morozova A. V.

Address

302020 Orel,
Naugorskoye Chaussee, 29
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,
41-98-21

www.ostu.ru

E-mail: met_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Department for Mass Communication. The certificate of registration ПИ № ФС77-35719 from 24.03.2009

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii» 29504

© OSTU, 2010

Contents

Machine building technology and toolware

<i>Bazin S.A., Markov V.V.</i> Method «Total productive maintenance» and the fields he application in the machine-building	7
<i>Boldyrev A.I., Suhochev G.A.</i> The combined methods of formation of surfaces of channels in difficulty processable materials	13
<i>Kirichek A.V., Selemenev M.F., Semenkin G.N., Ospova A.F.</i> Principles on the use epilamir tool at mandrelling	20
<i>Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A.</i> Optimization of the choice of the cutting tool on the basis of methods of the comparative analysis	23
<i>Steblecov Y.N., Tarapanov A.S.</i> Definition of forces of cutting of process нарезания cogwheels of transmission novikova by worm hobs	31
<i>Shupikov I.L., Bishutin S.G.</i> The equipment for processing and quality of long of cylindrical surfaces after petal grinding	35

Construction, calculation, material

<i>Vayner L. G.</i> Influence of kinematics of double-disc grinding process on machining accuracy	41
<i>Gorlenko A.O., Erokhin A.N.</i> Tribotekhnichesky tests of bearings of sliding	46
<i>Konoplyov V.I., Anufriev V.I., Anufriev S.V., Kurenev A.B.</i> The device for installation panels for walls in design position	49
<i>Matlakhov V.P.</i> Modernization of the machine of friction mu-1m for tests in condition of the oiling abrasive-oil mixture	53
<i>Nikishin V.N., Volochko V.V., Fokin R.A.</i> The problem of continuous torque converter of mechanical type	58
<i>Pleshakov V.V., Albagachiev D.A.</i> Hardening machinery surface plastic deformation	61
<i>Prudnikov M.I.</i> Technological ensuring of tribological properties of surfaces	65

Process modeling

<i>Ancev V.Yu., Tolokonnikov A.S., Kalabin P.Yu.</i> Modelling of limiting condition design from metal of bridge cranes with optimization of the sizes of cross-section sections	71
<i>Gorlenko A. O., Klyushnikov M. L.</i> The method of determining of plastic lubricants on the wears resistance of machine parts	75
<i>Ignatov P.V.</i> Capacious computer modeling the press-forms and fields he use in the instrumental production	79
<i>Leonenko N.A., Vanina E.A., Galtsov A.A., Kapustina G.G., Shvez N.L.</i> Laser-induced agglomeration of goldbearing dispersion medium and the mathematical simulation of temperature field of processing of laser agglomeration	83
<i>Koshin A.A., Shakirova N.Y.</i> The temperature field model of metal-polymeric composite in the grinding region	91

Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Antsiforova E.V., Pakholkin E.V.</i> Tribomonitoring of processes of modifying of working surfaces of friction units by repair-and-renewal compositions: the analytical review	95
<i>Kirichek A.V., Morozova A.V.</i> Complex estimation of quality of preparation of experts in the field of design-technological preparation of manufacture	101
<i>Mishin V.V., Podmasteriev K.V., Semenov V.V., Mayorov M.V., Chernyshov V.N., Selihov A.V., Shatalov K.V.</i> Research of work of the bearing on parameters of its electric resistance	108
<i>Protas'ev V.B., Kosarevskaya A.V., Razumov-Razdolov K.L.</i> Formation of expert estimations by development of administrative decisions	116
<i>Khaltov T.Ph., Zakirnichnaya M.M.</i> Detecting of the fatigue cross-section crack on shaft of rotor system on the basis of the modal analysis and vibration & acoustics diagnostics	124

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ

Технологический институт ОрелГТУ УИПКЦ «НИИЛегмаш» Политехнический колледж ОрелГТУ

Технологический институт ОрелГТУ является по сути старейшим на Орловщине образовательным учреждением, занимающимся подготовкой специалистов технического профиля. Свою историю он ведет с 1920 года, когда в Орле впервые были созданы курсы чертежников. В своей нынешней форме институт существует с 2005 года, когда на базе двух факультетов ОрелГТУ и Политехнического колледжа был создан Технологический институт ОрелГТУ. В 2007 году в структуре Технологического института ОрелГТУ был создан Научно-исследовательский институт «Технологии машиностроения», объединивший десять научно-технических центров, проблемных научно-исследовательских лабораторий, учебное проектно-конструкторское бюро и учебно-исследовательский проектно-конструкторский центр «НИИЛегмаш», который в этом году отметил свое пятидесятилетие.

Основной задачей Технологического института ОрелГТУ является подготовка специалистов для машиностроительного комплекса страны по системе непрерывного практикоориентированного профессионального образования. Сегодня в Технологическом институте ОрелГТУ обучается около двух тысяч студентов, получающих начальное профессиональное, среднее профессиональное и высшее профессиональное образование, ведется подготовка по нескольким направлениям магистратуры, аспирантуры и докторантуры в области наиболее

актуальных проблем современного машиностроения, работает докторский диссертационный совет.

В состав Технологического института ОрелГТУ входят три факультета, десять кафедр (в том числе и две старейшие кафедры университета - кафедра «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика» и кафедра «Автоматизированные станочные и инструментальные системы», которые входят в десятку лучших в университете, за все время своего существования ими было подготовлено свыше 5 тысяч специалистов), Научно-исследовательский институт «Технологии машиностроения», десять исследовательских центров и специализированных лабораторий, экспериментальное производство, а также учебно-производственные мастерские. Активно внедряемая в деятельность Технологического института Система менеджмента качества позволяет объективно оценивать результаты работы коллектива и оперативно реагировать на возникающие проблемы.

Одним из ведущих направлений инновационного развития Технологического института ОрелГТУ является информатизация и компьютеризация учебного процесса. Ватманы, линейки и карандаши уступили свое место компьютерам и прикладным программам, обеспечивающим автоматизацию конструкторско-технологической подготовки производства. Каждый десятый дипломный проект признается государственной аттестационной комиссией годным для реального производства, а каждый четвертый студент ВПО выполняет дипломный проект с элементами научно-исследовательской работы.

Самое серьезное внимание в Технологическом институте ОрелГТУ уделяется научно-исследовательской работе и инновационной деятельности в различных ее формах: выполнению работ по грантам и хозяйственным договорам; подготовке кадров высшей квалификации через аспирантуру и докторантуру ОрелГТУ; сотрудничеству как с российскими, так и с зарубежными научно-исследовательскими институтами, техническими вузами и инновационными центрами, патентно-лицензионной работе, проведению и участию в научных конференциях и выставках различного уровня, научно-исследовательской рабо-

те студентов, выпуску монографий и другой научной печатной продукции. В настоящее время Технологическим институтом ОрелГТУ заключено более 40 договоров о стратегическом партнерстве с российскими и зарубежными промышленными предприятиями, вузами и инновационными центрами. Научная деятельность оказывает положительное влияние на качество подготовки специалистов и является свидетельством плодотворной работы коллективов кафедр. Только за последние четыре года коллектив кафедр Технологического института издал более 40 монографий, учебных пособий и справочников в области технологии машиностроения и металлообработки, а также получил более 220 патентов на изобретения, а объем выполненных каждым преподавателем, имеющим ученые степени или ученые звания, НИР превысили в 2009 году 100 тыс.руб.

У Технологического института ОрелГТУ давние и прочные связи с ведущими техническими вузами и научными школами Москвы, Тулы, Брянска, Ростова, Курска и многих других городов. Ежегодно проводится международная научно-техническая конференция. Неоднократно такие конференции проводились совместно с вузами и производственными фирмами других стран – в Швеции, Турции, Финляндии, Египте, Израиле, Китае. Стала уже традиционной и студенческая региональная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительных производств», на которой студенты докладывают о наиболее интересных своих научных разработках.

Одним из приоритетных направлений развития образовательного пространства Технологического института ОрелГТУ является выявление студентов, склонных к изобретательской и исследовательской деятельности, и вовлечение их в техническое творчество уже на ранних этапах обучения. Результатом решения такой стратегической задачи является не только массовое участие, но и победы студентов в таких конкурсах и олимпиадах как Всероссийская выставка-конкурс научно-технического творчества молодежи, Программа «Участник молодежного научно-инновационного конкурса – У.М.Н.И.К.», Всероссийский конкурс «Национальное достояние России», Молодежный инновационный

конвент «Зворыкинская премия», Всероссийский конкурс научно-исследовательских и творческих работ студентов «Меня оценят в XXI веке», Всероссийский конкурс научно-исследовательских и творческих работ «ЮНЭКО», Всероссийская конференция «Юность. Наука. Культура», Всероссийский научно-технический конкурс «Молодежь и наука XXI века» и другие.

Технологический институт ОрелГТУ по-своему уникален, так как в нем реализован полный комплекс как учебной, так и научной подготовки кадров высшей квалификации. Преподавательский состав Технологического института ОрелГТУ представляет собой дружный коллектив единомышленников, которые сами являются ищущими творческими специалистами.

Аспиранты института практически ежегодно становятся именными стипендиатами Губернатора, Правительства и Президента. Ежегодно сотрудниками института защищаются кандидатские и докторские диссертации. Высокая активность Технологического института ОрелГТУ в научной сфере и является залогом того, что знания, которые получают студенты – самые передовые, и могут с успехом применяться ими в дальнейшем.

Редакционный Совет и редакционная коллегия журнала «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» поздравляет коллектив Технологического института ОрелГТУ, который динамично развивается и активно реагирует на вызовы времени, сохраняя при этом верность классической традиции подготовки специалистов, имеющих не только определенную совокупность профессиональных знаний, но и активную жизненную позицию, позволяющую выпускникам быть конкурентоспособными на современном рынке труда и занимать достойное место в жизни.

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 658.5.(075)

С.А. БАЗИН, В.В. МАРКОВ

МЕТОД «ВСЕОБЩЕЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ» И ОБЛАСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В этой статье рассмотрен процесс внедрения метода «Всеобщее обслуживание оборудования» (TPM) в промышленном производстве. Показана структура метода «Всеобщее обслуживание оборудования», построенная в соответствии с известным в теории управления качеством циклом Шухарта-Деминга.

Ключевые слова: управление качеством; метод «Всеобщее обслуживание оборудования»; цикл Шухарта-Деминга

In this article is consider the process of inculcation the method «Total Productive Maintenance» (TPM) in the industrial manufacture. Is show the structure of method «Total Productive Maintenance», which is construct at the conformity with known in the theory of quality management cycle of Shuhart-Deming.

Key words: quality management; method «Total Productive Maintenance»; cycle of Shuhart-Deming

Итак, для начала ответим на вопрос: «Что такое метод «Всеобщее обслуживание оборудования» или «метод TPM», и чем он может быть полезным современному российскому предприятию?». TPM (Total Productive Maintenance) – это один из методов, которые в совокупности образуют концепцию «Бережливое производство» (рисунок 1).

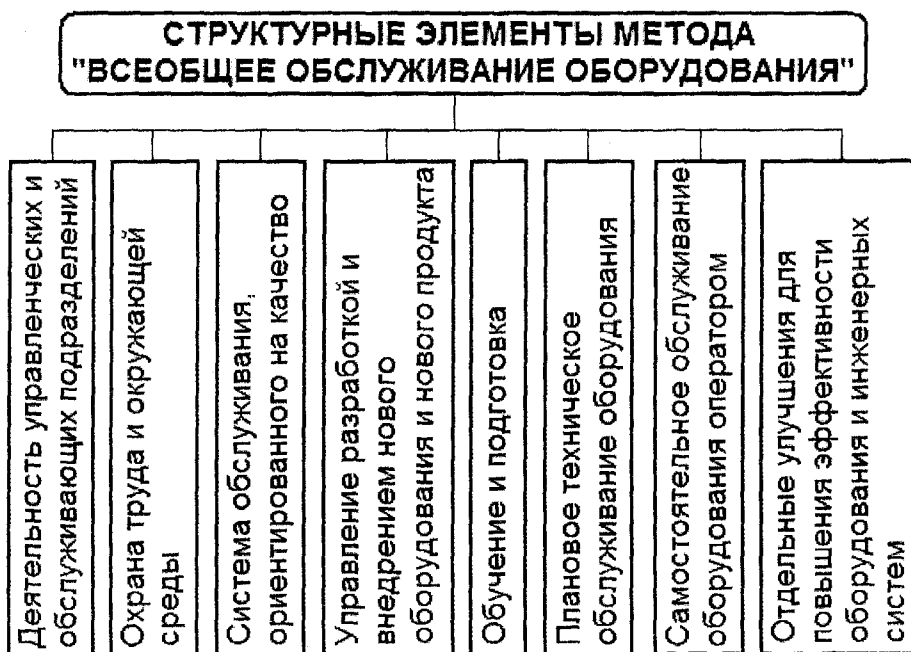


Рисунок 1 – Структурные элементы метода «Всеобщее обслуживание оборудования»

Целью внедрения метода «Всеобщее обслуживание оборудования» (TPM) является:

- 1) создание такого предприятия, в принципы действия которого было бы заложено стремление к предельной эффективности производственной системы;
- 2) создание механизма предотвращения любых потерь (отсутствие травматизма, брака, аварий и т.д.) объектом которого стал бы весь жизненный цикл производственной системы;
- 3) внедрение системы производительного обслуживания, в первую очередь на производстве, а затем в службе развития коммерческой службе, административных подразделениях;
- 4) в работе принимает участие весь персонал компании – от членов советов директоров до рядовых сотрудников;
- 5) отсутствие потерь достигается командной работой малых групп всего предприятия.

Такая постановка цели достаточно обширна и сложна для быстрого понимания, однако на примере результата применения метода ТРМ на конкретном предприятии, приведенном на рисунках 2 и 3 (на рисунках представлены фотографии участка пищевого предприятия до и после внедрения ТРМ), достоинства данного метода становятся очевидными.

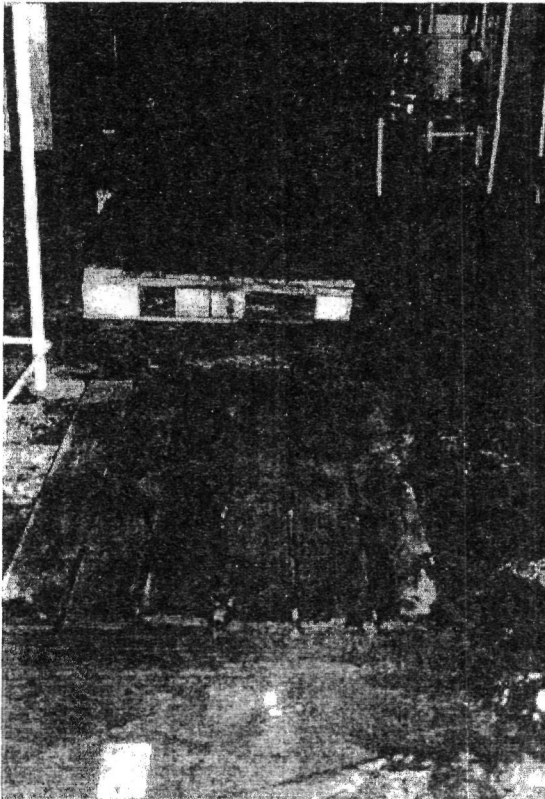


Рисунок 2 – Производственная среда до внедрения ТРМ

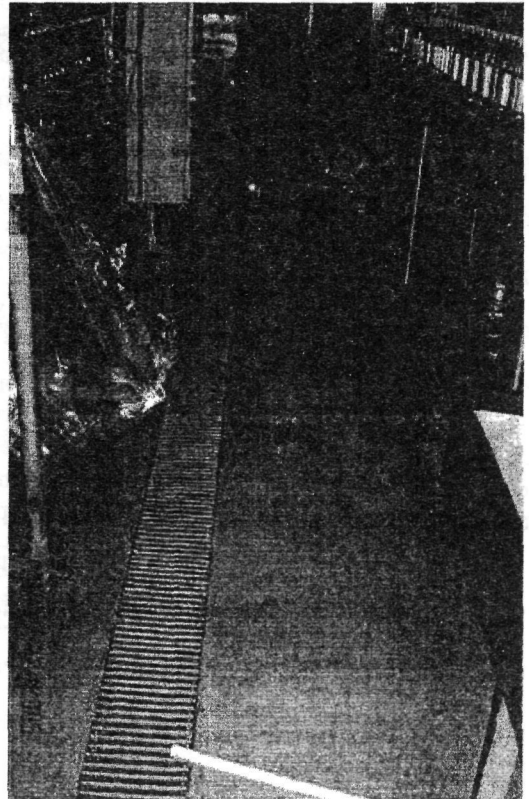


Рисунок 3 – Производственная среда после внедрения ТРМ

Теперь о пользе метода ТРМ. Если начинать модернизацию любого сложно оснащенного и постоянно загруженного работой предприятия, то начинать её необходимо именно с ТРМ, так как в отличие от западных предприятий, где большинство несоответствий связано с неправильными управленческими решениями, в России больший процент брака приходится на поставщиков сырья и ошибки при реализации технологических процессов, связанные именно с оборудованием и рабочими. Развертывание метода ТРМ предоставляет возможность добиться кардинального улучшения деятельности по следующим группам показателей:

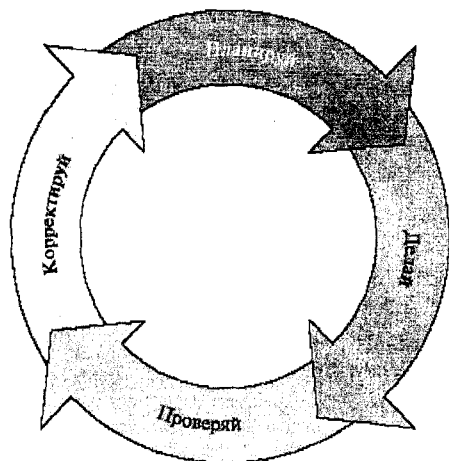
- 1) уменьшение себестоимости продукции на 30%;
- 2) сокращение количества брака и рекламаций в 10 раз;
- 3) предотвращение производственного травматизма, результатом которого могут быть невыходы на работу, и превышение нормативов воздействия на окружающую среду;

4) увеличение производительности труда по добавленной стоимости в 1,5-2 раза, повышение занятости оборудования во столько же раз, уменьшение количества поломок и аварий в сотни раз;

5) по возможности полное исключение случаев нарушения сроков поставок и уменьшение объёма незавершённого производства до 50%;

6) многократное увеличение инициативности персонала, которая измеряется количеством поданных сотрудниками рационализаторских предложений.

В реалиях российского производства, где преобладают оставшиеся с советских времен предприятия-гиганты, это позволяет во много раз увеличить прибыль предприятия.



Plan (Планируй) –
определение целей и задач,
определение способов достижения целей;

Do (Делай) –
обучение и подготовка кадров,
выполнение работ;

Check (Проверяй) –
проверка результатов выполнения работ;

Act (Корректируй) –
осуществление соответствующих
управляющих действий

Рисунок 4 – Цикл Шухарта-Деминга (PDCA) в интерпретации Каоро Исикавы

Убедившись в необходимости внедрения TPM, перейдем к циклу Шухарта-Деминга (рисунок 4). Для нас он интересен, прежде всего, в связи с проблемами внедрения и совершенствования современных систем менеджмента качества (СМК). Одна из основных целей внедрения СМК – создание таких условий в организации, когда происходит непрерывное улучшение каждого из её процессов. Взаимно усиливая друг друга, эти улучшения приводят к более совершенной системе. Частным критерием улучшения каждого из процессов может служить снижение числа несоответствий, выявляемых в ходе различных проверок, таких как внутренние аудиты качества, контроль за соблюдением технологической дисциплины, метрологический контроль, контроль покупной продукции, контроль продукции на каждом этапе ее жизненного цикла, выходной контроль и т.д. Каждый факт появления несоответствия должен приводить к выполнению определенной последовательности действий, а именно: коррекция (устранение несоответствия), анализ несоответствия, установление причины его появления, определение корректирующих действий, направленных на устранение причины несоответствия, выполнение этих действий и анализ их результативности и эффективности. Если же в ходе проверок удастся выявить факты, которые могут в будущем привести к возникновению несоответствий, то надо осуществить все вышеперечисленные действия, но только теперь их целью должно быть устранение причин потенциальных несоответствий. Решение проблемы ведет к улучшению процесса, а, следовательно, и к достижению запланированных результатов, удовлетворению потребителей и всех заинтересованных сторон и реализации принципа «постоянного улучшения».

В данной работе использован хорошо известный цикл Шухарта-Деминга PDCA (Планируй – Делай – Проверяй – Анализируй), в интерпретации Каоро Исикавы (рисунок 4).

Ознакомившись с теорией, приступим к практике. В соответствии с первым пунктом определим для себя цели и задачи. Наша цель совпадает с целями TPM, а чтобы определить задачи, необходимо ознакомиться с объектом нашей деятельности – оборудованием и системой его обслуживания. Жизненный цикл оборудования состоит из последовательного чередования двух фаз: эксплуатации и обслуживания. Ответственность за реализацию этих фаз

обычно возлагается на разные службы. Технологический персонал задействован в эксплуатации оборудования, а службы обслуживания (механики, электрики, программисты и т.п.) занимаются профилактикой и ремонтом. Подобное разделение обязанностей вполне естественно, поскольку эксплуатация и обслуживание требуют специфических навыков. Эксплуатационный персонал контролирует технологию изготовления продукции, следит за качеством, обеспечивает выполнение плановых показателей. Обслуживающий персонал осуществляет деятельность по контролю состояния оборудования, профилактическому обслуживанию и устранению неисправностей. К сожалению, подобное разделение функций зачастую служит причиной взаимного непонимания эксплуатационной и ремонтной служб и, как следствие, приводит к неэффективному обслуживанию оборудования в целом.

Налицо конфликт, но в чем же его причина? Для многих предприятий вполне обычной является ситуация, когда ремонтная и эксплуатационная службы имеют различные, не связанные друг с другом цели, и как следствие, различные показатели, характеризующие результативность их деятельности. Для эксплуатационников главное - выполнение плановых показателей. Зачастую это понимается как выполнение плана любой ценой и приводит к нещадной эксплуатации оборудования требующего профилактики или, что еще хуже, требующего немедленного ремонта. Для ремонтных служб главное - выполнение задач по приведению неисправного оборудования в работоспособное состояние. Однако когда оборудование раз за разом выходит из строя по причине неправильной эксплуатации, в среде служб поддержки возникает естественное ощущение, что труд ремонтника не ценится, а достижение запланированных показателей результативности не зависит от прикладываемых усилий.

Теперь можно определить наши задачи. Идеальным представляется случай, когда состояние оборудования (эксплуатация-обслуживание) может быть спрогнозировано в любой обозримый момент времени. Подобная предсказуемость может быть достигнута лишь в том случае, когда удастся полностью избавиться от форс-мажорных остановов оборудования по причине его выхода из строя. Вполне естественно, что любое оборудование подвержено износу и рано или поздно наступает такой момент, когда изношенные детали разрушаются, приводя к неполадкам оборудования в целом. Важно не допустить подобного развития событий, вовремя предугадать наступление критической ситуации и принять меры по ее предотвращению. Таким образом, из фазы обслуживания полностью должно быть устранено время, необходимое для внеочередного ремонта. В этом случае, оборудование может находиться либо в фазе эксплуатации, либо в фазе планового обслуживания.

Для того чтобы получить полный контроль над работоспособностью производственного оборудованием, необходимо коренным образом пересмотреть отношение к нему. Прежде всего, забота об оборудовании должна касаться не только ремонтную службу, но и производственный персонал. Это значит, что показатель эффективности использования оборудования должен стать определяющим для обеих структурных единиц. Несложные работы по профилактическому обслуживанию, мониторингу состояния, регистрации проблем оборудования могут быть возложены на эксплуатационных работников. Ведь кто, как не они, большую часть времени используют оборудование по его прямому назначению. Именно работники имеют возможность непрерывно наблюдать за состоянием оборудования и своевременно предпринимать меры для предотвращения критических ситуаций. Вместе с тем, задача ремонтных служб – так производить обслуживание, чтобы минимизировать вероятность его поломки во время эксплуатации. Для этого следует непрерывно анализировать возникающие технические проблемы и использовать результаты анализа для планирования планово-предупредительных ремонтов в соответствии с потребностями обслуживания, а также для создания инструкций по обслуживанию оборудования в процессе эксплуатации.

После установления целей и задач внедрения метода ТРМ, определяется способ их достижения. В общем случае на предприятии метод ТРМ разворачивается в 5 этапов:

- 1) оперативный ремонт;
- 2) обслуживание на основе прогнозов;
- 3) корректирующее обслуживание;

4) автономное обслуживание;

5) непрерывное улучшение.

Следует отметить, что этапы 4 и 5 совпадают с пунктами 5 и 6 цикла Шухарта-Деминга. В рамках реализации метода ТРМ разработана схема развертывания самостоятельного обслуживания оборудования операторами из 7 шагов (этапов):

1) чистка-проверка;

2) принятие мер по устранению источников загрязнения и труднодоступных мест;

3) разработка временных норм чистки-проверки и смазки;

4) общая проверка;

5) самостоятельная проверка;

6) стандартизация (поддерживающий контроль);

7) самоуправление и самоорганизация.

Некоторые шаги совпадают с этапами развертывания ТРМ, но не все составляющие этапов затрагивают непосредственно оператора оборудования.

Так как необходимым условием эффективного внедрения ТРМ является требование повышения общей культуры обслуживания оборудования персоналом, важнейшую роль играет обучение работников. Для объединения усилий и скоординированного их приложения следует организовать рабочую группу, которая будет отвечать за планирование деятельности и контроль результатов выполнения намеченных мероприятий. Необходимо организовывать «кружки качества» для рабочих, «группы качества» для менеджеров, «клубы качества» для руководства. Ни одно решение не должно «проталкиваться сверху», следует развивать институт лидерства, поощрять рационализаторство, использовать взаимное обучение, как между членами групп, так и между «кружками», «группами» и «клубами», так как большинство современных управленцев имеет экономическое образование и ему не всегда ясны принципы работы и материальная часть оборудования, а также потребности рабочих.

Определив методы и подготовив персонал, переходим к исполнению. Сначала коротко расскажем о схеме развертывания ТРМ непосредственно для оператора (7 шагов), а потом более подробно остановимся на этапах ТРМ.

На шагах 1-3 обеспечиваются базовые условия нормальной работы оборудования (чистка, смазка, затягивание болтов) и принимаются меры по предупреждению его принудительного износа. На шагах 4-5 добиваются повышения эффективности эксплуатации оборудования, переходят от предупреждения принудительного износа узлов и деталей к оценке и измерению степени их износа. На шаге 6 происходит переход от непосредственной работы с оборудованием к стандартизации, административной работе. На 7-м шаге наступает этап развертывания самостоятельного обслуживания в рамках командной работы автономно действующих малых групп.

Теперь рассмотрим этапы внедрения ТРМ на всем предприятии. На первом этапе внедрения ТРМ следует «выжать» всё, что только возможно из существующей системы обслуживания. Это приводит к тому, что проявляются её недостатки и становится очевидной необходимость перемен. Начать следует с всеобщей ревизии документов, регламентирующих деятельность по эксплуатации и ремонту. Попутно следует обратить внимание на то, какие виды работ выполняются стихийно или необоснованно, а какие возникли под воздействием объективной необходимости. Все виды работ следует регламентировать, указав ответственных лиц, временные рамки и основания для осуществления соответствующей деятельности.

Далее, необходимо проанализировать схему движения материальных потоков запасных частей и расходных материалов. На этом этапе следует обратить внимание на удобство и скорость получения необходимых материалов со склада, а также механизм их доставки к месту обслуживания.

Пристальное внимание следует уделить результату ремонтно-профилактических работ. Достаточным ли является проведенное обслуживание? Полностью ли восстановлена его функциональность? Как часто используются временные меры по восстановлению узлов? Что необходимо для повышения качества ремонтных работ? Основная цель данного этапа – сис-

тематизация существующего порядка обслуживания и ремонта оборудования, а также полное восстановление его функциональности.

На большинстве предприятий в той или иной мере присутствует система профилактического обслуживания оборудования. В основном, в форме планово-предупредительных ремонтов (ППР). Основная идея ППР заключается в том, чтобы произвести необходимый ремонт или замену деталей до того как неисправность оборудования приведет к остановке производства. В подавляющем большинстве случаев объем работ выполняемых в ППР определяется паспортными характеристиками оборудования (на основании данных производителя) и дефектной ведомостью, которую формируют ремонтники, руководствуясь текущей ситуацией. Однако, чтобы адекватно прогнозировать потребность в том или ином виде обслуживания мало просто владеть текущей ситуацией, надо еще и знать историю обслуживания и эксплуатации каждой единицы оборудования. Только из анализа истории можно почерпнуть закономерности появления тех или иных неисправностей. И для этого отнюдь не достаточно рекомендаций производителя вроде – «этот подшипник менять каждые полгода». Ведь оборудование работает не в лабораторных условиях. Вполне вероятно, что производитель мог не учесть условий Вашего предприятия. Поэтому важно не только учитывать данные производителя, но и автономно собирать статистическую информацию о проблемах, анализировать ее и использовать для планирования работ по обслуживанию оборудования.

Поставщик любого оборудования рассчитывает на его эксплуатацию во вполне определенных условиях и с вполне определенной целью. В условиях реального предприятия не всегда имеется возможность точно следовать рекомендациям производителя. Для этого есть много причин: начиная от климатических условий и заканчивая рыночной конъюнктурой, которая заставляет модернизировать оборудование для расширения ассортимента. Так или иначе, оборудование не всегда может соответствовать требованиям конкретных условий, что, естественно, должно привести к соответствующему изменению работ по обслуживанию оборудования. В этом случае обслуживание технологического оборудования должно включать в себя комплекс мероприятий, которые позволят оборудованию максимальным образом соответствовать условиям его эксплуатации. Фактически речь идет о совершенствовании оборудования, повышении его надежности, удобства эксплуатации и обслуживания. На этом этапе, в деятельность по выявлению путей совершенствования оборудования кроме ремонтников должен быть непосредственно вовлечен и эксплуатационный персонал.

Данный этап является наиболее сложным в процессе внедрения ТРМ, поскольку связан с непосредственным вовлечением эксплуатационного персонала в деятельность по обслуживанию оборудования. К этому шагу следует подойти очень осторожно, чтобы дополнительные функции были восприняты если уж не с энтузиазмом, то, по крайней мере, с осознанием их полезности. Вовлечению персонала в самостоятельное обслуживание оборудования обязательно должно предшествовать изучение принципов действия оборудования, его основных характеристик, возможных неисправностей и способов их диагностики. Соответственно должны быть пересмотрены должностные и рабочие инструкции персонала. Для облегчения автономного обслуживания необходимо использовать средства визуализации, напоминающие о необходимости обращать внимание на критические места и не забывать об их обслуживании. По окончании 4-го этапа, работники должны четко себе представлять, какие работы должны выполнять они, а для каких требуется присутствие квалифицированных специалистов ремонтных служб. Не менее важно участие персонала в сборе информации о состоянии оборудования. При этом не должно быть мелочей, на которые можно «махнуть рукой». Любое изменение параметров оборудования, появление грязи, подтеков, запахов должно регистрироваться, а сведения должны доводиться до лиц, ответственных за анализ состояния оборудования.

Деятельность по непрерывному улучшению – это один из базовых принципов бережливого производства. Применительно к ТРМ это означает мотивацию работников на непрерывное повышение квалификации, поиск возможностей модернизации оборудования, повышение его ремонтнопригодности и надежности. Кроме этого, систематической ревизии долж-

на подвергаться и сложившаяся система ТРМ. Особое внимание при этом необходимо уделять способам взаимодействия служб, эффективности сбора информации о неисправностях, актуальности регламентирующей документации. Метод ТРМ не должен вступать в противоречие с нормами техники безопасности, охраны труда и экологии. Исходя из этих соображений, следует наметить общие направления совершенствования метода ТРМ и следовать им при определении задач для отдельных участков и подразделений.

Эффективность метода ТРМ подтверждена временем и большим количеством компаний, выбравших этот путь. В области ТРМ существует даже премия для наиболее результативных предприятий, внедривших методику. Надо признать, что сделать это непросто. Основная сложность – скоординированное объединение усилий всех работников предприятия (об этом уже упоминалось выше). Однако не следует забывать, что результативность и эффективность хозяйственной деятельности предприятия в целом зависит от скоординированного действия всех подразделений. И чем более сложные условия будет предлагать рыночная экономика, тем более актуальной будет становиться задача сплочения коллектива [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Итикава, А. ТРМ в простом и доступном изложении [Текст] / А. Итикава, И. Такаги, Ю. Такэбэ, К. Ямасаки, Т. Идзуми, С. Синоцука // Пер. с яп. А.Н. Стерляжникова; Под науч. ред. В.Е. Растимешина, Т.М. Куприяновой. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2008. – 128 с.

Базин Сергей Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орёл

Студент специальности «Управление качеством»

Телефон: (4862)41-98-76; E-mail: pms35vm@yandex.ru

Марков Владимир Владимирович

Орловский государственный технический университет, г. Орёл

К.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Телефон: (4862)41-98-76; E-mail: pms35vm@yandex.ru

УДК 621.002

А.И. БОЛДЫРЕВ, Г.А. СУХОЧЕВ

КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАНАЛОВ В ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ

В статье рассмотрены возможности интенсификации получения профильных полостей и каналов в труднообрабатываемых материалах комбинированными методами. Раскрыты механизмы комбинированного воздействия для предлагаемых методов обработки, приведены результаты экспериментальных исследований и методики выбора оптимальных режимов для реализации новых процессов.

Ключевые слова: комбинированный метод, эрозионная обработка, микрошарики, анодное растворение.

In article opportunities of an intensification of reception of profile cavities and channels in труднообрабатываемых materials are considered by the combined methods. Mechanisms of the combined influence for offered methods of processing are opened, results of experimental researches and techniques of a choice of optimum modes for realization of new processes are resulted.

Keywords: the combined method, erosive processing, microballs, anode dissolution.

Большинство нагруженных деталей транспортной техники получают из труднообрабатываемых материалов, поддающихся в большинстве случаев только нетрадиционным процессам формообразования. Так, электроэрозионный метод позволяет получать каналы в изделиях сложной формы в труднодоступных местах без использования сложной кинематики перемещения инструмента. Однако, электроэрозии свойственна невысокая скорость удаления припуска (на порядок и ниже по сравнению с лезвийной обработкой), хотя достижимые точность и качество поверхностного слоя в большинстве случаев отвечают требованиям проектировщика [1].

Предлагается метод интенсификации электроискровой обработки путем нанесения на электрод-инструмент слоев материалов, способных создавать кумулятивный эффект. В России проводились исследования по использованию электродов с покрытием цинком, наносимым гальваническим методом. Достигнуто многократное повышение производительности, но на обрабатываемой поверхности местные каверны (углубления), которые ухудшали показатели поверхностного слоя, и в ряде случаев деталь нуждалась в доработке, снижающей выигрыш от повышения производительности процесса. Глубина каверн была небольшой, но введение чистовых операций для их удаления вызывало погрешности профиля и могло снизить эффективность использования инструмента с покрытием. Очевидно, что в процессе протекания термического кумулятивного воздействия на зону обработки покрытие с электрода расходуется, поэтому желательна замена материала инструмента в процессе формообразования детали. Наиболее подходящим для такого вида обработки является изготовление изделий непрофилированным проволочным электродом с металлическим покрытием [2] (например цинком). На рисунке 1 приведены основные этапы механизма формирования микропрофиля поверхности при эрозионно-термической обработке электродом-инструментом 1 с покрытием 2.

В момент разряда между покрытием 2 и заготовкой 4 (рисунок 1, а) образуется канал проводимости в диэлектрической среде 5 и возникает поток электронов 3, который определяет динамику прохождения тока (A) на прямой (рабочей) полуволне. Одновременно образуется обратный поток ионов и обратный ток (B), имеющий значительно меньшую величину по сравнению с A , так как при коротком времени импульса (τ) основная часть более массивных (по сравнению с электронами) ионов не успевает достигнуть поверхности покрытия 2. Под действием прямой (рабочей) полуволны тока A образуется углубление (лунка) на заготовке 4 с зоной термического воздействия (нагревом) около лунки (ЗТВ).

Обратная полуволна тока (B) вызывает нагрев покрытия 2 (рисунок 1,б), его разогрев, образование плазмы, формирование термической струи (рисунок 1,в). Рабочая среда при эрозионно-термической обработке содержит воду (H_2O), которая в зоне плазмы диссоциирует на водород (H_2) и кислород (O_2). Кислород способствует развитию кумулятивного эффекта и образованию струи с высокой плотностью тепловой энергии, которая соизмерима с таким показателем на солнце, где плотность мощности излучения до 10^8 Вт/см, а случае плазмы плотность мощности излучения достигает 10^7 Вт/см² и более. Плазменная струя 8 (рисунок 1,в) с большой скоростью перемещается к заготовке 4.

Повышению мощности излучения способствует форма лунки 7 на покрытии 2 (рисунок 1,в), которая концентрирует поток 8 тепловой энергии в зону термического воздействия, где уже имеется нагрев от первичного импульса (рисунок 1,а). В результате образуется глубокая (h на рисунке 1,г) лунка 9 со своей зоной термического воздействия (ЗТВ). Если принять во внимание длительность импульсов квантовых генераторов 10^{-2} - 10^{-3} мс, то длительность разрядов от электроэрозионных генераторов (0,1-0,3 мс) при скважности 0,1-0,5 позволяет рассматривать время действия струи, как часть длительности импульса при электроискровой обработке. Последующие импульсы тока происходят по мере подготовки зоны обработки к появлению разряда (деионизация среды, местное сопротивление и др.). Однако через некоторый период такой разряд возникает, и имеется высокая вероятность, что к этому моменту в ЗТВ имеется нагрев, и интенсивность воздействия последующего разряда с термическим влиянием струи обеспечит повышенную глубину « h » и размер лунки 11 (рисунок 1, г).

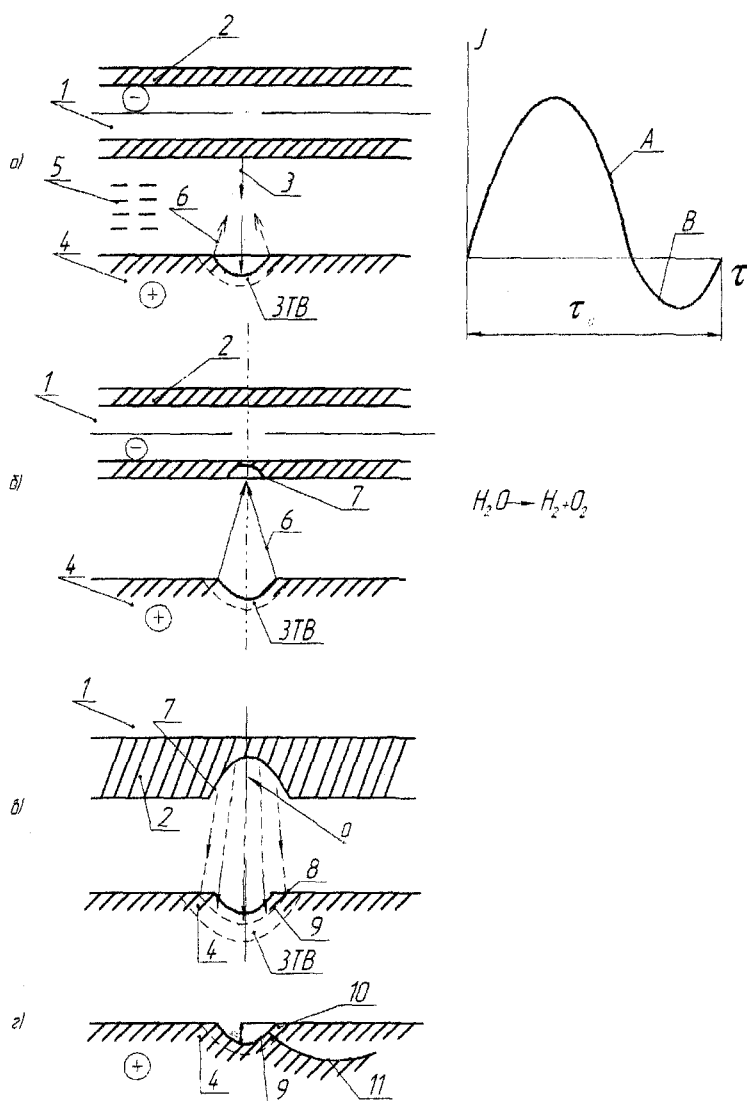


Рисунок 1 – Формирование микропрофиля при эрозионно-термической обработке

а) разряд между электродом-инструментом (катод) и заготовкой (анод);

б) воздействие обработкой полуволны на покрытие электрода-инструмента;

в) формирование струи теплового воздействия; г) действие вторичного импульса разряда;

ЗТВ – зона термического воздействия; J – ток; τ – время; τ_0 – время импульса; A – рабочая полуволна тока;

B – обратная полуволна тока; h – глубина лунки на заготовке.

1 – электрод-инструмент (проволока); 2 – покрытие; 3 – вектор импульса разряда (поток электронов); 4 – заготовка; 5 – рабочая среда; 6 – вектор действия обратной полуволны; 7 – зона действия на катод обратной полуволны; 8 – струя плазмы (кумулятивный эффект); 9 – лунка на заготовке после воздействия разряда и термического расплавления металла струей плазмы; 10 – зона нагрева на границе лунки; 11 – образование соседней лунки.

Величина « h » характеризует показатель шероховатости (R_z). Для обработки проводным электродом по [2]

$$R_z = \frac{\beta^2 r h}{3(r^2 + h^2)}, \quad (1)$$

где r – радиус лунки;

β – коэффициент перекрытия, который учитывает снижение глубины лунки за счет удаления материала с вершины сопрягаемых углублений. Величина β может изменяться от 0,3 до 0,7.

Подобный разброс результатов не позволяет расчетным путем определить высоту неровностей, хотя теоретически возможно установить глубину лунки (h) и величину r (соотношение $r/h \approx 1,5$). Более точно величину R_z для проволочного электрода можно установить через энергию импульса (A_u)

$$R_z = K_u A_u^p, \tag{2}$$

где K_u – коэффициент, обобщающий свойства материалов электродов, воздействие на процесс режимов обработки, рабочей среды, геометрических размеров зоны обработки;

p – показатель степени. В зависимости от режима $p = 0,3-0,4$.

Величина K_u для черновых режимов для сталей $K_u = 2-12$, для твердых сплавов $K_u = 1-3$.

Для непрофилированного электрода-проволоки без покрытия шероховатость

$$R_z = K_r C^{1/3} U^{2/3}, \tag{3}$$

где K_r – эмпирический коэффициент. Для легированных сталей $K_r = 0,39-0,4$; углеродистых сталей $K_r = 0,41-0,42$; инструментальных материалов $K_r = 0,35-0,4$; твердых сплавов $K_r = 0,2-0,3$;

C – емкость конденсаторов (для RC системы генератора);

U – напряжение на электродах.

При использовании проволоки с покрытием (в частности, цинком) глубина лунок возрастает (в зависимости от свойств обрабатываемого материала) до 2-3 раз.

На рисунке 2 приведены экспериментальные данные, показывающие влияние покрытия на высоту неровностей (R_z) при обработке сталей (I) и твердых сплавов (II). Режим обработки $A_u = 5 \times 10^{-3}$ Дж, напряжение 120В, рабочая среда – керосин. Аналогичные исследования проведены для чистовой обработки (напряжение 80В). Это позволило получить коэффициенты K_u для RC системы обработки проволокой с покрытием цинком (таблица 1).

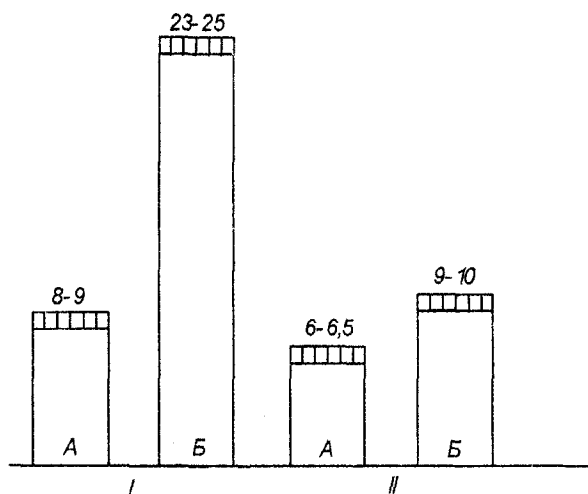


Рисунок 2 – Изменение высоты неровностей R_z (мкм) в зависимости от конструкции проволочного электрода-инструмента: А – латунная проволока диаметром 0,2 мм; Б – латунная проволока диаметром 0,2 мм с цинковым покрытием толщиной до 0,03 мм.

I – сталь конструкционная; II – твердый сплав группы ВК

Таблица 1 – Выбор коэффициента K_u

Материал детали	Вид обработки	Величина коэффициента K_u		
		Минимальная	Максимальная	Средняя
Сталь конструкционная	Черновая	25	120	70
	Чистовая	10	28	25
Твердый сплав	Чистовая	1,5	10	20

В ряде случаев после обработки проволокой с покрытием необходима чистовая операция для снижения высоты неровностей и трещиноватого слоя. Припуск для чистовой обработки можно выбрать с учетом сведений в таблице 2. В таблице 2 приведены показатели экономически достижимой начальной шероховатости, которые обеспечивают наибольшую производительность при использовании двухэтапной обработки. В этом случае исходная шероховатость (после предварительной обработки) несколько выше, чем приведенная на рисунке 2. Производительность обработки электродом с покрытием на оборудовании отечественного производства до 5 раз выше, чем без покрытия, а для электродов, имеющих многослойные покрытия, скорость разделения увеличивается на порядок и более. При этом следует учитывать, что в обратной зависимости от производительности находится глубина микротрещин, которая при работе в экстремальных условиях эксплуатации является определяющим фактором для ресурса работы оборудования.

Таблица 2 – Припуск на чистовую обработку электродом без покрытия

Материал детали	Исходная шероховатость R_z , мкм	Достижимая шероховатость R_z , мкм	Припуск на обработку, мм
Сталь конструкционная	40	2-3	0,05-0,06
	10-12	2-3	0,03-0,04
Титановый сплав	50-60	3-3,5	0,08-0,1
	15-20	3-3,5	0,03-0,05
Твердый сплав	3-5	1-1,5	0,02-0,03

Равномерная обработка поверхностного слоя глубоких пазов с гарантированным «залечиванием» микротрещин до настоящего времени не была реализована в полном объеме. Решение этой проблемы возможно при разработке метода распределения контактного давления рабочей среды по профилю обрабатываемой поверхности, создании специализированных средств технологического оснащения и выбора оптимального гранулометрического состава многокомпонентной рабочей среды. На основании анализа выдвинутых предположений была предложена методология создания регулярного микрорельефа поверхности с помощью комбинированной струйной обработки. На основании экспериментальных исследований удалось показать, что очень хорошая прочность сцепления может достигаться при выполнении следующей операции. В качестве материала для струйной обработки применяется, например, микропорошки из стали ШХ-15 с размером фракции порядка 60–100 мкм [1]. Такие микрошарики округлой формы для струйной обработки почти полностью свободны от вредных окисей, а поверхность обрабатываемой детали оказывается равномерно шероховатой (не более 1,2–1,8 мкм). Это становится возможным за счет того, что струйная обработка производится с использованием микропорошка стабильного гранулометрического состава. Материал для получения порошка распыляется в расплавленном состоянии, и поэтому его зерна имеют форму, приближенную к сферической.

В нашем случае комбинированная обработка образцов проводилась на установках эжекторного типа (рисунок 3) с наложением тока низкого напряжения при соблюдении следующих режимов:

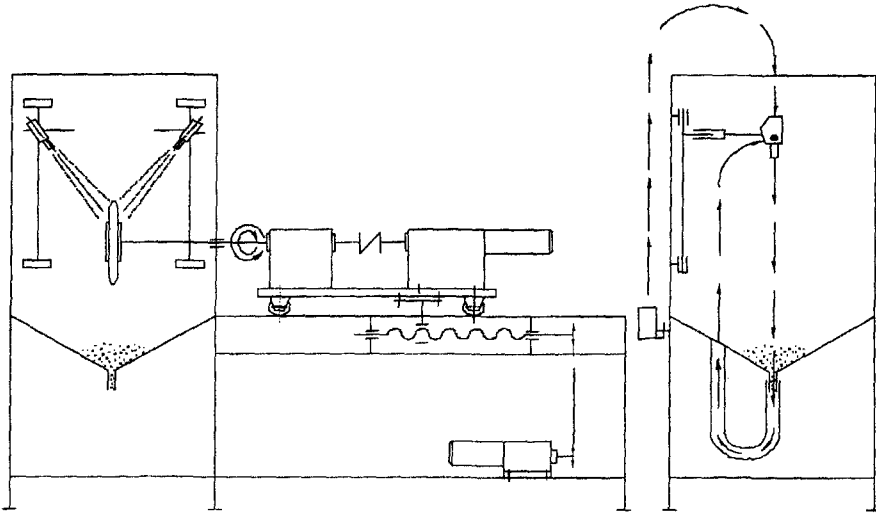


Рисунок 3 – Принципиальная схема эжекторной установки

- расстояние от оси сопла между его срезом и поверхностью $L=50 \pm 5$ мм;
- время обработки каждого участка поверхности – 60 с;
- угол соударения потока микрошариков с поверхностью $\Delta\alpha=60^\circ \pm 5^\circ$;
- диаметр сопла – 10 мм;
- скорость вращения шпинделя установки $n_{sp}=20-60$ мин⁻¹;
- давление сжатого воздуха в струйном аппарате – 0,2–0,4 МПа;
- напряжение 2–10 В;
- расход газожидкостной слабопроводящей среды – 2 м³/мин.

Газожидкостная слабопроводящая среда состояла из воздуха и распыленной до капельной фракции технической воды, являющейся слабым проводником [3]. Эффект от воздействия токов низкого напряжения заключался в том, что если принять в качестве исходной информации высоту микронеровностей до обработки (R_{Z0}), а ограничительными условиями – время действия тока, то процесс съема неровностей за единичное соударение принимает вид (рисунок 4)

$$(R_{Z1} + \delta) = R_{Z0} - (\alpha/\gamma) \cdot \eta j_{cp} \tau_k \quad (4)$$

где α – электрохимический эквивалент материала заготовки;

γ – удельная плотность материала заготовки;

j_{cp} – средняя плотность тока;

τ_k – длительность контакта ($\tau_k=0,1-0,3$ мкс);

η – коэффициент выхода по току.

Ток (J) в зоне контакта может достигать 10А, площадь контактного действия гранулы составляет 0,1–0,3 мм². Тогда средняя плотность тока

$$j_{cp} = 0,5 J/F. \quad (5)$$

Экспериментальные исследования показали, что время обработки с целью получения требуемой шероховатости составляет доли минуты, что на порядок ниже по сравнению с параметром, показанным при виброударном осаивании микронеровностей.

Достижимое изменение шероховатости в этом случае $\Delta R_{z \max} = R_{Z0} - (R_{Z1} + \delta)$ зависит от скорости анодного растворения, которая в момент удара резко увеличивается из-за повышения удельной проводимости в месте соударения в 2-3 раза. При этом создается сглаженный микрорельеф без концентраторов микротрещин и микровыступов, а микрошарики формируют стабильную шероховатость, определяемую их размерами и механическими свойствами с

учетом сплошности перекрытия не менее 95% (для высокопрочных никелевых сплавов $R_{z\text{ ср}} = 2,5-3,2$ мкм).

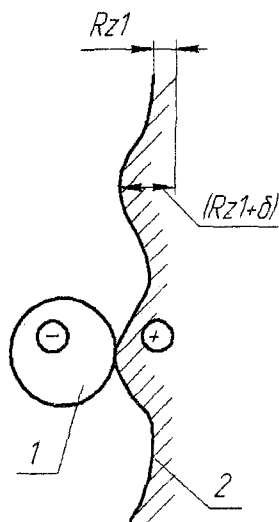


Рисунок 4 – Схема формирования микрогеометрии в полости канала:
 1 – гранула-катод; 2 – анод-заготовка;
 $Rz1$ – глубина микрораствориваний неупрочненного участка заготовки;
 $(Rz1 + \delta)$ – микропогрешность и микроуглубление.

Как показали дальнейшие исследования, для труднодоступных участков внутренних поверхностей каналов после эрозионно-термической обработки комбинированная струйная обдувка микрошариками является самым лучшим видом отделки и упрочнения. На основании проведенной серии испытаний удалось показать, что после струйной обработки поверхностей, формообразованных электроэрозией, достигается более высокая равномерность наклепа и остаточных напряжений, что позволит увеличить предел выносливости поверхностного слоя покрытия и является дополнительным резервом увеличения срока эксплуатации изделий в экстремальных условиях эксплуатации [4, 5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Сухочев Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г. А. Сухочев. – М.: «Машиностроение», 2004. – 287 с.
- 2 Смоленцев В.П. Изготовление инструмента непрофилированным электродом. М.: Машиностроение, 1967. – 160 с.
- 3 Вопросы технологии комбинированной обработки поверхностей длинномерных деталей под покрытием / Сухочев Г.А. и др. // Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж: ВГТУ, 2010. – С. 161–165.
- 4 Сухочева Е.Г. Технология комбинированной обработки каналов малого сечения с обеспечением эксплуатационных показателей / Е.Г. Сухочева, С.Н. Коденцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 11(35). – С. 25–28.
- 5 Болдырев А.И. Обеспечение заданного качества поверхностного слоя каналов комбинированной обработкой / А.И. Болдырев // Известия ОрелГТУ. – 2009. № 2-3/274(560). – С. 59-63.

Болдырев Александр Иванович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Кандидат технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология машиностроения»

Тел. (4732) 53-09-73

Сухочев Геннадий Алексеевич

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

Тел. (4732) 58-37-15

E-mail: suhotchev@mail.ru

УДК 621.9

А.В.КИРИЧЕК, М.Ф. СЕЛЕМЕНЕВ, Г.Н. СЕМЕНКИН, А.Ф.ОСИПОВА

ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭПИЛАМИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ДОРНОВАНИИ

Рассмотрены методы повышения эффективности обработки поверхностным пластическим деформированием – дорнованием. Предложены пути повышения стойкости инструмента.

Ключевые слова: эпилам, поверхностно-пластическое деформирование, стойкость инструмента.

Methods of increase of efficiency of processing by superficial plastic deformation are considered. Ways of increase of firmness of the tool are offered.

Keywords: epilam, is superficial-plastic deformation, firmness of the tool.

Среди всего многообразия методов высокой эффективностью и простотой реализации отличаются деформационные методы – обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД). Одним из таких методов финишной обработки отверстий является дорнование [1]. Это производительный процесс, сочетающий в себе возможности чистовой, упрочняющей, калибрующей и формообразующей обработки. Дорнование состоит в холодном пластическом деформировании заготовки при поступательном перемещении через отверстие с некоторым натягом специального инструмента. При этом обеспечивается повышение точности отверстий, интенсивное сглаживание микронеровностей и упрочнение поверхностного слоя; после дорнования на оптимальном режиме в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения. В качестве инструмента при дорновании используют стальные и твердосплавные шары, однозубые и многозубые прошивки и протяжки [4], [3].

Наиболее работоспособными являются инструменты из твердых сплавов группы ВК (ВК6, ВК8, ВК15, ВК20). Процесс дорнования протекает в условиях непрерывного контакта инструмента и обрабатываемой поверхности. Большая площадь контакта, суммарный натяг и деформационные усилия в зоне обработки приводят к выдавливанию смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) из зоны обработки, в результате чего при перемещении деформирующего элемента относительно обрабатываемой поверхности часто имеет место сухое трение, которое сопровождается возрастанием усилия дорнования и существенным ухудшением качественных характеристик поверхности заготовки вследствие появления отдельных глубоких рисок, что не допустимо при финишной обработке [2]. При трении без смазки происходит высокий локальный нагрев микрообъемов металла, что приводит к схватыванию, т.е. возникновению металлических связей вследствие молекулярного воздействия трущихся поверхностей и диффузии атомов, а это создает условия для появления нароста на кромках деформирующего инструмента, и выходу его из строя.

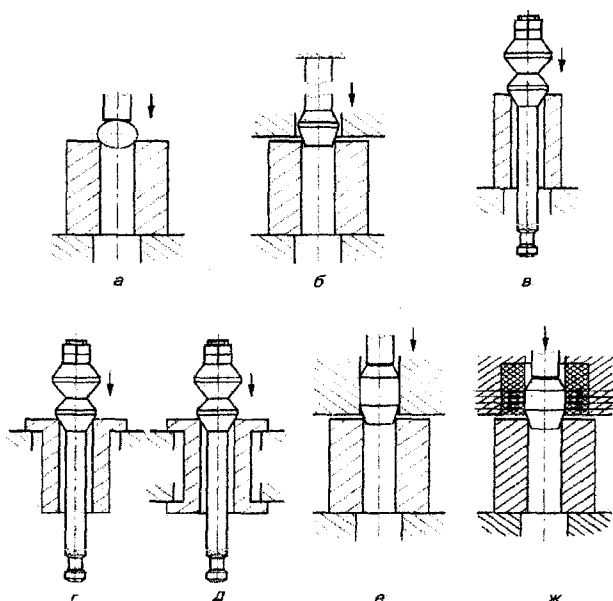


Рисунок 1 – Схемы дорнования отверстий

а – шаром (со сжатием заготовки); б – консольно закрепленной однозубой прошивкой (со сжатием заготовки); в – многозубой протяжкой (со сжатием заготовки); г – многозубой протяжкой (с растяжением заготовки); д – многозубой протяжкой (с осевым заневоливанием заготовки); е – однозубой перемещаемой толкателем прошивкой, размещенной с зазором в направляющей втулке (со сжатием заготовки); ж – однозубой перемещаемой толкателем прошивкой, размещенной с натягом в направляющей втулке (со сжатием заготовки).

Работоспособность инструмента можно повысить за счет нанесения покрытий на инструментальный материал, что обеспечивает создание на рабочих поверхностях инструментов необходимый комплекс свойств по повышению его стойкости. Изменение поверхностных свойств инструментального материала позволяет контактным площадкам инструмента эффективно сопротивляться всем видам изнашивания. Нанесение покрытий на основе нитридов, карбидов, карбонитридов, боридов и оксидов тугоплавких металлов является одним из путей повышения стойкости формообразующего инструмента. Применяются различные технологии нанесения износостойких покрытий: электроискровое легирования, ионное азотирование, ионно-плазменное нанесение, химические и физические методы осаждения покрытий в вакууме и т.д. [5]. Однако, с увеличением толщины покрытия снижается его прочность, возрастает опасность отслаивания и скалывания. Также нанесение покрытий являются дорогостоящими и трудоемкими процессами, требующими применения специального оборудования, соблюдение требований по защите окружающей среды. В настоящее время при снижении темпов промышленного производства для промышленных предприятий оказывается порой дорого и экономически невыгодно, что ведет к удорожанию инструмента. Нанесение покрытий производится на стадии изготовления инструмента и само предприятие, как правило не в состоянии осуществить технологию нанесения покрытий без специального оборудования.

Деформационное упрочнение внутренних цилиндрических поверхностей является сложной технологической операцией. Это обусловлено закрытостью отверстий и связанными с этим трудностями ориентации инструмента относительно обрабатываемой поверхности, подвода СОТС в зону обработки. В настоящее время при обработке распространены различные способы подачи СОТС в зону обработки: полив свободно падающей струей жидкости; струйно-напорная подача, подача в распыленном состоянии, а также применение ПАВ.

Для подачи в зону контакта дорна и обрабатываемой заготовки необходимо применение специальных приспособлений для подачи СОТС, что приводит к необходимости разработки сложного технологического оснащения и, как следствие, к удорожанию инструмента.

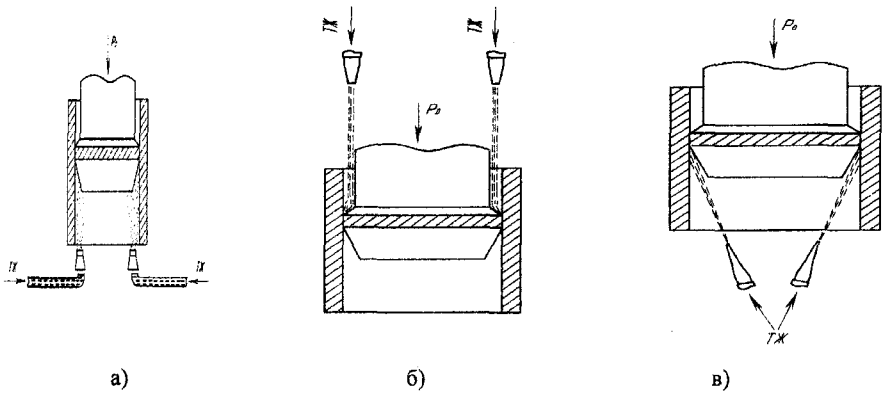


Рисунок 2 – Основные способы подвода СОТС в зону обработки при дорновании отверстий

а – подача в распыленном состоянии; б – полив свободно падающей струей жидкости; в – подача в распыленном состоянии

При применении смазочного материала уменьшается схватывание инструмента с заготовкой и обеспечивается снижение деформирующего усилия, повышается точность и качество поверхности. При обработке заготовок из углеродистых и малолегированных конструкционных сталей в качестве смазочного материала рекомендуется использовать жидкости на масляной основе МР-1, МР-2, МР-3, МР-7. При дорновании отверстий в заготовках из нержавеющей, высоколегированных сталей и сплавов применяются специальные смазочные материалы на основе эпоксидных смол и твердых наполнителей типа графита, дисульфида молибдена, нитрида бора и др. [5].

Одним из возможных путей удержания масляных и технологических СОТС является нанесение на его рабочие поверхности фторированных ПАВ из растворов эпиламов [6].

Основной эффект от нанесения тонкой пленки эпилама на рабочую поверхность инструмента заключается в удержании СОТС в зоне резания, снижения коэффициента трения, длительного сохранения работоспособности, уменьшения износа режущей части инструмента.

В результате эпиламирания молекулы технологического модифицирующего состава проникают в приграничный слой и образуют на его поверхности тончайшую нано пленку толщиной 3 ... 50 нм, которая позволяет снизить коэффициент трения в 2-3 раза, а поверхностную энергию до 1000 раз. Это обеспечивает придание трущимся поверхностям антифрикционных и антиадгезионных свойств. Сформированная барьерная пленка выдерживает температуру до 450 С, не разрушается при ударных нагрузках до 300 кг/мм, не растворяется ни в одном из применяемых углеводородных растворителей.

В Орловском государственном техническом университете впервые разработаны нанотехнологии эпиламирания инструмента для повышения его стойкости и эффективности механической обработки. Были проведены совместные исследования Орловским государственным техническим университетом и НИИЧасПром ООО «Микромеханика» обработки технологий эпиламирания инструмента различными составами нанопокровтий эпиламов.

В ходе выполненных авторами экспериментальных исследований по влиянию эпиламирания на процесс резания, работоспособность инструмента установлено, что эпиламирание инструмента способствует снижению составляющих усилий резания, приводит к снижению температуры в зоне контакта, уменьшает интенсивность развития очагов износа как передней так и задней поверхностей инструмента, что в целом позволяет повысить стойкость инструмента в 3 и более раз в зависимости от правильного выбора технологических условий обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Проскураков Ю.Г., Романов В.Н., Исаев А.Н. Объемное дорнование отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. -223 с.
- 2 Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. -320 с.
- 3 Розенберг А.М., Розенберг О.А., Посвятенко Э.К. и др. Расчет и проектирование твердосплавных деформирующих протяжек и процесса протягивания. – Киев: Наукова думка, 1978. -255 с.
- 4 Инструменты для обработки точных отверстий / С.В Кирсанов, В.А. Гречишников, А.Г. Схиртладзе, В.И. Кокарев – М.: Машиностроение, 2005.– 336с.
- 5 Мацевитый Б.М. Покрытия для режущих инструментов. Харьков, Вища школа. Изд-во Харьковского ун-та, 1987, 128 с.
- 6 Киричек А.В., Звягина Е.А. Эпиламирование - нанотехнология для повышения эффективности механической обработки // Справочник. Инж. журн. - 2007. - N 2(119).

Киричек Андрей Викторович

Орловский государственный технический университет г. Орел
Доктор технических наук, профессор, директор Технологического института ОрелГТУ
тел(4862)555524, E-mail avk@ostu.ru

Селеменев Михаил Федорович

Орловский государственный технический университет г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
тел(4862)541503, E-mail Selemeney2007@yandex.ru

Семенкин Григорий Николаевич

Орловский Государственный технический университет, г. Орел
магистр кафедры «Технология машиностроения и конструкторско- технологическая информатика»
Тел. (848646) 2-06-72
E-mail: semenkin1@gmail.com

Осипова Анна Федоровна

Орловский государственный технический университет г. Орел
Аспирант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
тел(4862)555524, E-mail: ti@ostu.ru

УДК 621.9.02

Д.В. ЛОБАНОВ, А.С. ЯНЮШКИН, Д.А. РЫЧКОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Представлены методики моделирования режущего инструмента и сравнительного анализа конструкций в зависимости от задаваемых условий производства, реализованные в программном продукте, позволяющем работать с базой данных инструментов и производить выбор оптимальной конструкции режущего инструмента в соответствии с требованиями к качеству изделия, работоспособности инструмента, производительности обработки и экономичности.

Ключевые слова: моделирование, сравнительный анализ, оптимальная конструкция

Techniques of modelling of the cutting tool and the comparative analysis of designs depending on set conditions the manufactures realised in software product are presented, allowing to work with a database of tools and to make a choice of an optimum design of the cutting tool according to requirements to quality of a product, working capacity of the tool, productivity of processing and profitability.

Keywords: modelling, the comparative analysis, optimum design

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для любого типа производства характерно непрерывное совершенствование технологий изготовления продукции, внедрение прогрессивных способов и методов подготовки и осуществления технологического процесса, применение широкого спектра современных режущих инструментов. Рациональный выбор режущего инструмента во многом определяет достижение высоких качественных и точностных характеристик изделия, оказывает влияние на его себестоимость и производительность обработки.

Высокая вариативность конструкций режущего инструмента, особенно сборных, которым располагает современная промышленность, а также неоднозначность потребностей при изготовлении изделия в каждом конкретном случае создает трудности при выборе инструмента, соответствующего условиям производства. В связи с этим оптимизация выбора и подготовки режущего инструмента является актуальной задачей на сегодняшний день.

Для решения этой проблемы необходимо, во-первых, разработать методику моделирования режущего инструмента и обеспечить его систематизацию с применением ЭВМ, что позволит создать базу данных инструментов в соответствии с определенной классификацией. Во-вторых, необходимо разработать методику сравнительного анализа конструкций в зависимости от задаваемых условий производства, которая выявляет структуру выбора оптимального инструмента для конкретного технологического решения.

Разработанные методики реализованы в виде программного продукта, позволяющего создавать базу данных режущих инструментов и производить выбор оптимальной конструкции для заданных условий производства.

Таким образом, это позволит решить проблему хранения и обработки информации о режущих инструментах, систематизировать имеющиеся на производстве конструкции, сократить время на поиск и обработку информации при выборе оптимальной конструкции режущего инструмента и в целом автоматизировать инструментальное хозяйство на предприятиях.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Моделирование режущего инструмента является основополагающей составляющей при организации инструментального производства на предприятиях, использующих в своих технологиях обработку резанием.

В ходе анализа информации по существующим конструкциям режущих инструментов выявлены основные характеристики, с помощью которых можно описать любую его конструкцию. Инструмент рассматривается как совокупность структурных, геометрических, конструктивных и эксплуатационных характеристик, объединенных в трех основных частях: режущей, корпусной и крепежной [1].

Режущая часть инструмента описывает:

1. Конструктивное исполнение инструмента. По этому признаку они разделены на: цельные, сборные с паяным, клееным и с механическим соединением режущих элементов.
2. Геометрические характеристики режущей части. Здесь выделяются геометрические параметры, оказывающие значительное влияние на процесс резания.
3. Материал режущей части. В этой части формируется список инструментальных материалов, применяемых в современной промышленности.
4. Точностные и размерные характеристики режущей части.
5. Профиль режущей кромки. Выделяют прямой и фасонный профили. Прямой профиль затачивают по прямой поверхности с образованием заднего угла, а фасонный профиль делают острозаточенным или с затылованием его по задней поверхности.
6. Износостойкое покрытие и упрочнение. В качестве износостойких покрытий применяют, в основном, карбид титана (TiC), нитрид титана (TiN) и нитрид танта-

ла (TaN), которые наносятся на инструментальный материал с определенной толщиной. Упрочнение режущей части выполняют цианированием, различными видами азотирования, сульфацианированием, термообработкой, лазерной обработкой и другими способами.

Корпусная часть описывает:

1. Для вращающихся сборных инструментов, например фрез, плазы в корпусной части, их количество, которое соответствует количеству зубьев инструмента, линейные и геометрические размеры пазов.
2. Материал корпусной части. Представлены группы конструкционных и легированных сталей для изготовления корпуса.
3. Упрочнение корпусной части. Представлены параметры общего или местного упрочнения.
4. Размеры корпусной части.

Крепежная часть описывает схему крепления: наличие клиньев, крепежных и регулировочных болтов, штифтов, их количество, размеры, обозначение и точность.

Кроме того, важно назначение инструмента и его изготовитель.

Таким образом, режущий инструмент представляет собой систему, внутри которой существуют сложные связи, определяемые следующими характеристиками: конструктивное исполнение, геометрия режущей части, материал, точностные и размерные характеристики, качественное состояние исполнительных и базисующих поверхностей. Наиболее наглядным средством описания структуры сборного режущего инструмента может служить формализованное представление с помощью графовой модели, описывающей все возможные варианты конструкций сборного инструмента и выявляющей систему структурных, геометрических, конструктивных и эксплуатационных параметров [2].

Такая графовая структура является обобщенной, описывает все возможные варианты конструкций режущего инструмента и позволяет, с одной стороны, разложить на элементы любую его конструкцию с целью получения более полного представления об ее устройстве, с другой стороны, построить логическую схему найденного технического решения и оценить его работоспособность [1, 3, 4].

В связи с этим, разработанная модель послужит основой для формирования базы данных сборного режущего инструмента, встроенной в подсистему информационного обеспечения, автоматизированного проектирования и анализа конструктивных решений.

МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ ИНСТРУМЕНТА

Для определения оптимальной конструкции режущего инструмента используются методы, основанные на выявлении критериев, наиболее значимых для производства в каждом конкретном случае. Обозначим эти критерии через K_i , а конструкции, для которых они оцениваются через X_i .

Выделим множество критериев через $K_1, K_2, K_3 \dots K_k$, где k – количество критериев, по которым производится анализ конструкции режущего инструмента. Каждый из критериев имеет ряд параметров $t_1, t_2, t_3 \dots t_m$, влияющих на его значение. Влияние этих параметров выражается в виде функциональной зависимости:

$$K = f(t_1, t_2, t_3, \dots, t_m),$$

Множество сравниваемых конструктивных решений инструмента представим в виде: $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$, где n – количество режущего инструмента, имеющегося в распоряжении предприятия.

Критерии, присущие каждой конструкции выразим в виде матрицы смежности:

$$M(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & K_1 & K_2 & K_3 & \dots & K_k \\ x_1 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1k} \\ x_2 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2k} \\ x_3 & a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n & a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nk} \end{pmatrix}$$

Элементы матрицы принимают количественные значения показателей, по которым оценивается соответствующий критерий, либо значение «0». Если критерий обозначен как значимый в конкретном случае, то элементы a_{ij} принимают определенные значения в соответствующем столбце матрицы. Значение «0» элементы a_{ij} принимают тогда, когда критерий оценки не является значимым, в матрице появляется «нулевой» столбец.

При построении матрицы необходимо учитывать для каждого критерия условие, от которого зависит решение об оптимальности конструкции: если конструкция считается более предпочтительной при наибольшем значении критерия, то элемент a_{ij} принимается равным ему: $a_{ij} = [K_{ij}]$. В случае, когда предпочтительным является меньшее значение критерия, необходимо принимать a_{ij} , равное обратному результату: $a_{ij} = \frac{1}{[K_{ij}]}$. Такой порядок построения матрицы смежности необходим для правильного определения рациональной конструкции режущего инструмента при задаваемых производственных условиях.

Далее, по матрицам смежности, рассчитывается итерированная значимость I-ого и II-ого порядка и весовой критериальный коэффициент для каждой конструкции.

Итерированная значимость первого порядка для каждой i -той конструкции определяется по формуле:

$$Q_i^1 = \sum_{j=1}^n a_{ij} ;$$

Итерированная значимость второго порядка рассчитывается с учетом значимости первого порядка каждого рассматриваемого варианта:

$$Q_i^2 = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot Q_j^1 ;$$

Весовой критериальный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$q_i = \frac{Q_i^2}{\sum_{i=1}^n Q_i^2} ;$$

Результаты расчета весового критериального коэффициента сводятся в результирующий вектор:

$$q(n) = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix} ;$$

где n – количество сравниваемых конструкций.

Наибольшее значение весового критериального коэффициента свидетельствует о большей рациональности применения конструкции.

КРИТЕРИИ ДЛЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Методика сравнительного анализа конструкций режущего инструмента, описанная выше, дает возможность оценить его параметры и выбрать наиболее рациональную конструкцию в зависимости от задаваемых условий производства.

Сущность методики заключается в определении критериев по каждой конструкции режущего инструмента. К таким критериям отнесены: производительность и качество обработки, работоспособность инструмента и его экономичность [5].

На производительность обработки, например при фрезеровании, влияют режимы резания, а также число зубьев фрезерного инструмента.

Производительность в этом случае определяется по формуле:

$$P = S_z \cdot z \cdot t \cdot \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d}, \text{ мм}^2/\text{мин};$$

где S_z -- подача на зуб, мм/зуб;
 z -- число зубьев фрезы;
 t -- глубина резания, мм;
 n -- число оборотов в минуту инструмента, мин^{-1} .
 V -- скорость инструмента, м/мин;
 d -- диаметр резания инструмента, мм.

Другим параметром, влияющим на работоспособность, является период стойкости режущего инструмента T . Нами исследованы процессы обработки композиционных материалов сборным фрезерным инструментом и получены зависимости периода стойкости инструмента от режимов резания и угла заострения режущей кромки $T = f(S_z, t, V, \beta)$; и от процентного содержания связки (Co) в твердом сплаве $T = f(Co)$.

Кроме того, период стойкости зависит и от прочностных характеристик инструментального и обрабатываемого материалов: пределов прочности и текучести, твердости, ударной вязкости инструментального и обрабатываемого материалов, коэффициента трения между материалами, напряжений в режущем элементе [6].

Период стойкости от влияния этих характеристик может быть выражен в виде:

$$T = K_T \cdot T_3, \text{ м}$$

где K_T -- экспериментальный коэффициент резания, выражающий отношение характеристик исследуемых материалов к характеристикам материалов, на которых был произведен эксперимент;

T_3 -- период стойкости, полученный экспериментальным путем, м;

$$K_T = \frac{\frac{\sigma_{ВИ}}{\sigma_{ВО}} \cdot \frac{\sigma_{ТИ}}{\sigma_{ТО}} \cdot \frac{H_{И}}{H_{О}} \cdot \frac{a_{И}}{a_{О}} \cdot f}{\frac{\sigma_{ВИЭ}}{\sigma_{ВОЭ}} \cdot \frac{\sigma_{ТИЭ}}{\sigma_{ТОЭ}} \cdot \frac{H_{ИЭ}}{H_{ОЭ}} \cdot \frac{a_{ИЭ}}{a_{ОЭ}} \cdot f_3},$$

$\sigma_{ВИ}$, $\sigma_{ВО}$ - пределы прочности обрабатываемого и инструментального материалов (справочные данные);

$\sigma_{ВИЭ}$, $\sigma_{ВОЭ}$ - пределы прочности обрабатываемого и инструментального материалов, на которых получен экспериментальный период стойкости;

$\sigma_{ТИ}$, $\sigma_{ТО}$ - пределы текучести обрабатываемого и инструментального материалов;

$\sigma_{ТИЭ}$, $\sigma_{ТОЭ}$ - пределы текучести обрабатываемого и инструментального материалов, на которых получен экспериментальный период стойкости;

$H_{И}$, $H_{О}$ - твердость обрабатываемого и инструментального материалов;

$H_{иэ}, H_{оэ}$ - твердость обрабатываемого и инструментального материалов, на которых получен экспериментальный период стойкости;

$a_{и}, a_{о}$ - ударная вязкость инструментального и обрабатываемого материалов;

$a_{иэ}, a_{оэ}$ - ударная вязкость инструментального и обрабатываемого материалов, на которых получен экспериментальный период стойкости;

$f, f_{э}$ - коэффициент трения между материалами соответственно для определяемого и экспериментального периода стойкости.

Результирующая работоспособность режущего инструмента определяет среднее значение периода стойкости, полученное по каждой из зависимостей.

На качество обработки оказывают влияние режимы резания и число зубьев инструмента. Качество поверхности характеризует шероховатость.

Таким образом, зависимость качества поверхности от параметров выражается функцией и определяется на основании экспериментальных исследований:

$$R_z = f(S_z, t, V, z), \text{ мкм}$$

Методика сравнительного анализа конструкций инструмента включает в себя оценку экономической целесообразности применения определенного вида инструмента и его конструктивных особенностей для задаваемых условий производства.

Экономичность конструкции зависит от многих параметров, учитывающих стоимость инструмента, его качество и целесообразность применения в каждом конкретном случае.

Сущность расчета экономичности заключается в определении приведенных затрат по каждой конструкции инструмента и сравнении полученных значений. В данном случае приведенные затраты рассчитываются с учетом того, что тип производства и годовая программа выпуска изменяют конечный результат пропорционально для всех конструкций.

Таким образом формула для расчета приведенных затрат примет вид:

$$ПЗ = \frac{C_{фр} + N_{рем} \cdot C_{рем} + Ц_{ок} + (t_{з.п.} + t_{уст}) \cdot C_ч \cdot i}{T_n \cdot z \cdot i}, \text{ руб/м}$$

где $C_{фр}$ - стоимость фрезы, руб.;

$N_{рем}$ - число перестановок или ремонта режущих элементов;

$C_{рем}$ - цена ремонта режущих элементов, руб.;

$Ц_{ок}$ - цена одного комплекта режущих элементов, руб.;

$t_{з.п.}$ - время на заточку одной фрезы, поворот или замену пластин;

$t_{уст}$ - время на установку фрез и настройку станка, ч;

$C_ч$ - часовая ставка рабочего, руб/ч;

T - период стойкости режущей кромки инструмента, м;

z - число режущих элементов;

i - допустимое число переточек режущих элементов или поворотов режущих

пластин.

Стоимость фрезы, цена одного комплекта и число режущих элементов определяется в зависимости от конструктивных особенностей режущего инструмента, заложенных производителем. Допустимое число перестановок, ремонта переточек режущих элементов также устанавливается производителем инструмента с учетом обеспечения необходимой надежности конструкции и его работоспособности. Цена ремонта режущих элементов, время на заточку одной фрезы, поворот или замену пластин, время на установку фрез и настройку станка и часовая ставка рабочего определяются из соответствующей нормативной документации для конкретного вида работ. Период стойкости режущей кромки инструмента определяется из математических моделей, представленных выше.

Таким образом, представленные методики являются средством, позволяющим осуществить выбор оптимальной конструкции режущего инструмента в зависимости от требуемых критериев производства: производительности, экономичности, качества поверхности и работоспособности инструмента.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИК ПРИ ВЫБОРЕ ИНСТРУМЕНТА

Методика сравнительного анализа, описанная выше, реализована в виде автоматизированной программы определения оптимальной конструкции, интерфейс которой позволяет работать с базами данных, а также производить расчет и определение оптимальной конструкции режущего инструмента при заданных условиях производства [5, 7]. Главная форма диалогового окна программного модуля для составления базы данных инструментов представлена на рис. 1.

The screenshot shows a software interface with the following sections:

- Header:** "Данные Стрелка" (Data Arrow) and "Номер записи" (Record Number).
- Manufacturer:** "Назначение" (Designation) and "Завод изготовитель" (Manufacturer) - "Новосибирский инструментальный завод".
- Construction Type:** "Вид конструктивного исполнения" (Design type) with options: Цельная (Integral), Сборная (паяное соединение) (Welded assembly), and Сборная (клепное соединение) (Riveted assembly). "Сборная (паяное соединение)" is selected.
- Material:** "Материал режущей части" (Cutting part material) - "Спектральный ВК3-М".
- Dimensions:** "Параметрические размеры режущей части" (Cutting part parameters) including Diameter (150 мм), Length (20,5 мм), Width (60,8 мм), Height (20 мм), Front angle (15 град), and Back angle (10 град).
- Profile:** "Профиль режущей части" (Cutting part profile) with options: Прямой (Straight), Фасонный остроугольный (Chamfered), and Фасонный зашлифованный (Chamfered and ground). "Фасонный зашлифованный" is selected.
- Coatings:** "Износостойкое покрытие и упрочнение" (Wear-resistant coating and hardening) with fields for "Вид упрочнения" (Hardening type) and "Азотирование низкотемпературное" (Low-temperature nitriding).
- Material:** "Материал покрытия" (Coating material) - "TiN".
- Thickness/Depth:** "Толщина покрытия, мкм" (Coating thickness, μm) - "5-7"; "Глубина упрочнения, мкм" (Hardening depth, μm) - "10-15".
- Body Part:** "Корпусная часть инструмента" (Tool body part) with fields for "Упрочнение" (Hardening) - "Общее" (General), "Местное" (Local), "Не имеется" (None); "Материал корпусной части" (Body material) - "Конструкционная сталь" (Structural steel); "Сталь 30Х" (Steel 30X).
- Dimensions of Body:** "Размеры корпусной части" (Body dimensions) including "Диаметр отв." (Drill diameter) - "40 мм", "Посадка отв." (Drill fit) - "H9", "Наруж. диаметр" (Outer diameter) - "140 мм", "Ширина" (Width) - "60 мм".
- Fasteners:** "Схема крепления" (Fastening scheme) with checkboxes for "Клин" (Wedge), "Регулировочный болт" (Adjusting bolt), "Крепежный болт" (Fastening bolt), and "Штифт" (Pin), each with a quantity field.
- Final Dimensions:** "Линейные размеры" (Linear dimensions) including "Угол заклинивания" (Wedge angle) - "12 мм", "Обозначение резьбы" (Thread designation) - "М6", "Точность" (Accuracy) - "7", "Обозначение резьбы" (Thread designation) - "М8", "Точность" (Accuracy) - "7", "Обозначение резьбы" (Thread designation) - "0 мм", "Точность" (Accuracy) - "0".

Рисунок – 1. Диалоговое окно программы для проектирования режущего инструмента

Данный модуль позволяет описать конструкцию режущего инструмента в диалоговом режиме. В верхней части диалогового окна располагается основное меню, позволяющее выполнять операции, связанные с определением оптимальной конструкции инструмента, создавать отчеты, содержащие информацию об имеющихся конструкциях, производить поиск информации по параметрам, задаваемых пользователем и выводить его на печать. Кроме того, имеется возможность вывода справки о программе.

Ниже располагается навигатор, позволяющий перемещаться по записям, редактировать, добавлять и удалять данные.

Основное поле программы позволяет вносить информацию о материалах режущей и корпусной частей, конструктивному исполнению, профилю режущей части, параметрических размерах режущей и корпусной частей, наличии износостойких покрытий и упрочнения, наличии в схеме крепления штифтов, болтов и клиньев, а также назначении инструмента и т.п. [8, 9].

Для поиска оптимальной конструкции необходимо выбрать в меню пункт «Данные», затем «Оптимальные конструкции», после чего откроется доступ ко второму программному модулю, интерфейс которого представлен на рис. 2.

В диалоговом режиме предлагается задать обрабатываемый материал, критерии для расчета и режимы резания. В зависимости от введенной информации производится расчет, результат которого выводится в нижней части диалогового окна в виде оптимального варианта конструкции режущего инструмента с описанием его номера в базе данных, стоимости и конструктивного исполнения режущей части.

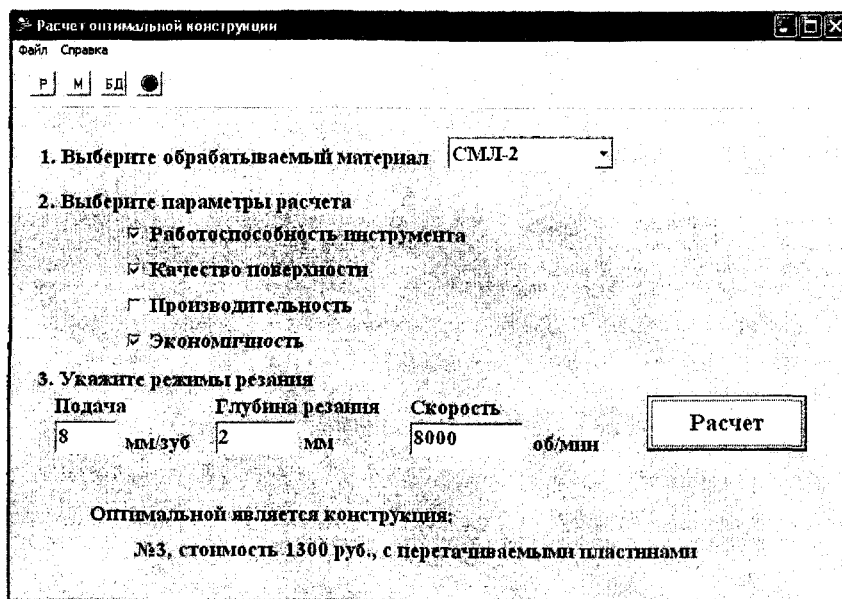


Рисунок – 2. Диалоговое окно программы для выбора оптимальной конструкции режущего инструмента

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате исследования нами получены следующие результаты:

1. Решена важная задача хранения и обработки информации по конструкциям режущих инструментов, имеющих в распоряжении предприятия;
2. В результате применения методик моделирования и сравнительного анализа, реализованных в виде программного обеспечения, сокращается время на поиск наиболее рационального варианта;
3. В программе совмещаются модули, позволяющие создавать базу данных инструментов и проводить сравнительный анализ конструкций, что дает возможность производить расчеты и выявлять оптимальную конструкцию режущего инструмента на основе данных, имеющих на предприятии;
4. Реализация представленных методик позволит повысить уровень автоматизации инструментального хозяйства на предприятиях.

Представленная программа может быть использована в отраслях промышленности, где используется режущий инструмент и есть необходимость в обоснованном выборе инструмента для задаваемых условий производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Лобанов, Д.В. Автоматизация процесса создания баз данных сборного фрезерного инструмента / Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков: Механики XXI века. VI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – 338 с., С. 327 – 331.
- 2 Янюшкин, А.С. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств / А.С. Янюшкин, С.О. Сафонов, В.А. Торопов, Ю.Н. Стебеньков, Н.Р. Лосева, Т.Т. Ереско, А.Н. Баранов, Д.В. Лобанов, В.Ю. Попов, А.А. Сурьев, С.А. Якимов, А.Б. Лосев, Б.В. Федоров: Монография. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2006. – 302 с.

- 3 Рычков, Д.А. Автоматизация процесса выбора конструкции режущего инструмента / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов. Механики – XXI веку. VII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 428 с.
- 4 Рычков, Д.А. Компьютерная поддержка инструментального производства / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов. Математические методы в технике и технологиях ММТТ-21: сборник трудов XXI Международной научной конференции. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008, 274 с.
- 5 Янюшкин, А.С. Сравнительный анализ конструкций фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков. Системы. Методы. Технологии: – 2009. – №3. С. 83 – 85.
- 6 Янюшкин, А.С. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления инструментальным производством / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков, Т.Е. Лисова. Современные проблемы механики: материалы международной научно-технической конференции. – Ташкент, 2009. – 416 с.
- 7 Янюшкин, А.С. Анализ данных при выборе оптимальной конструкции фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков, К.Б. Тюменцев, А.С. Дудин. Решетневские чтения: материалы XIII Междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та имени академика М.Ф. Решетнева (10-12 нояб. 2009, г. Красноярск): в 2 ч.; под общ. ред. Ю.Ю. Логинова / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. - Красноярск, 2009. – Ч.2. – 338 с.
- 8 Лобанов, Д.В. Пути совершенствования технологии подготовки к работе сборного инструмента для обработки древесины и композиционных древесных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков. Сборник выставки-сессии инновационных проектов. – Ижевск: КнигоГрад, 2008. – 118 с. С 28 – 34.
- 9 Рычков, Д.А. Программные продукты для автоматизации подготовки инструментального производства на предприятиях / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов. Научно-техническое творчество молодых. Ползуновский альманах. Барнаул. Алтайский гос. техн. университет им. И.И. Ползунова. – 2008. - №4. – 225 с. С 214 – 216.

Янюшкин Александр Сергеевич

ГОУ ВПО «Братский государственный университет», г. Братск
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология машиностроения»
Тел. (3953) 32-53-60
E-mail: yanyushkin@brstu.ru

Лобанов Дмитрий Владимирович

ГОУ ВПО «Братский государственный университет», г. Братск
Кандидат технических наук, доцент
Тел. (3953) 32-53-97
E-mail: mf_nauka@brstu.ru

Рычков Даниил Александрович

ГОУ ВПО «Братский государственный университет», г. Братск
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»
Тел. (3953) 32-53-97
E-mail: dielektrik84@mail.ru

УДК 621.914.5

СТЕБЛЕЦОВ Ю.Н, ТАРАПАНОВ А.С.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРОЦЕССА НАРЕЗАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС
ПЕРЕДАЧИ НОВИКОВА ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ**

Приведены зависимости для определения кинематических изменений углов режущей части, толщины срезаемого слоя и составляющих силы резания.

Ключевые слова: *исходный контур, математическое отображение, передачи Новикова, кинематическое изменение углов режущей части инструмента, толщина срезаемого слоя, составляющие силы резания.*

Dependences for definition of kinematic changes of corners of a cutting part, width of a cut off stratum and components of force of cutting are reduced.

Keywords: an initial head loop, mathematical map, transmissions Novikova, kinematic change of corners of a cutting part of the instrument, width of the cut off stratum, making forces of cutting.

С момента появления зацепления Новикова, выполнено значительное количество исследований теоретического и экспериментального характера. Хорошая прирабатываемость зацепления способствует повышению контактной прочности. Внедрение таких передач приводит к повышению нагрузочной способности, долговечности силового привода либо к снижению массы редукторов. Достоинства зацепления в ряде случаев могут быть реализованы лишь при надлежащем качестве изготовления колес [1]. Несмотря на это технология производства таких зубчатых передач осталась не достаточно разработана, отсутствуют сведения в общедоступной российской справочной литературе по оптимальным режимам обработки. При назначении режима обработки червячным фрезам, для получения зубчатых колес передачи Новикова, ориентируются на обычные модульные фрезы. В этой связи разработка технологии производства таких передач является актуальной темой исследования.

Для изучения сил, возникающих при нарезании зубьев инструментами червячного типа, было разработано математическое отображение схемы резания, являющееся стержнем системной методики расчетов режущей части инструмента (производящей поверхности, режущих кромок) и параметров процесса резания. Численный анализ сил резания включает определение рабочих углов червячной фрезы и параметров срезаемого слоя.

Были приняты следующие обозначения:

ψ – угол между осью OY и линией, проходящей через середину зуба инструмента, обрабатывающего данную впадину колеса в любом его положении;

φ – угол поворота фрезы в плоскости YZ ;

Δh – параметр режущей кромки.

Разработка математического отображения схемы резания зубчатых колес передачи Новикова червячными фрезами производилась на основе профиля исходного контура ГОСТ 15023-76 (Рисунок 1).

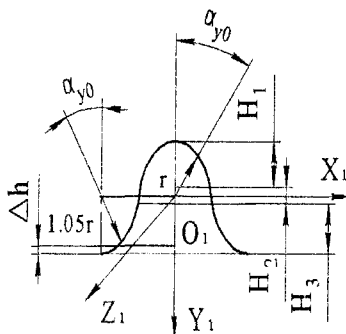


Рисунок – 1 Задание исходного контура в плоскости XU

$$H_1 \begin{cases} X_1 = r \cdot \sin(\pm \alpha_{y0}) \\ Y_1 = 1,05r - H_2 - H_3 - \Delta h; \\ Z_1 = 0 \end{cases} H_2 \begin{cases} X_1 = D \operatorname{htg}(\pm \alpha) \\ Y_1 = 1,05r - H_2 - \Delta h; \\ Z_1 = 0 \end{cases} H_3 \begin{cases} X_1 = \pm t + 1,05r \cdot \sin(\mp \alpha_{y0}) \\ Y_1 = 1,05r - \Delta h \\ Z_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Математическое отображение схемы резания зубьев обрабатываемого колеса при обработке инструментами червячного типа было получено при осуществлении последовательных итераций. Нижний индекс при координатах X , Y , Z указывает номер итерации. Конечные формулы имеют вид [2]:

$$\begin{aligned}
 X_3 &= r_1 \sin \mu - r_1 \mu \cos \mu + \{ X_1 \cos(\mu + \nu) + [Z_1 \cos \gamma - (Y_1 - h_a) \sin \gamma] \sin(\mu + \nu) \} \cos \mu - \\
 &- \left\{ [Z_1 \sin \gamma + (Y_1 - h_a) \cos \gamma + h_a - (a_{\mu} - r_1)] \cos \varphi + \right. \\
 &\left. + [-X_1 \sin(\mu + \nu) + (Z_1 \cos \gamma - (Y_1 - h_a) \sin \gamma) \cos(\mu + \nu)] \sin \varphi + a_{\mu} - r_1 \right\} \sin \mu \\
 Y_6 &= r_1 \cos \mu + r_1 \mu \sin \mu + \{ X_1 \cos(\mu + \nu) + [Z_1 \cos \gamma - (Y_1 - h_a) \sin \gamma] \sin(\mu + \nu) \} \sin \mu + \\
 &\left\{ [Z_1 \sin \gamma + (Y_1 - h_a) \cos \gamma + h_a - (a_{\mu} - r_1)] \cos \varphi + \right. \\
 &\left. + [-X_1 \sin(\mu + \nu) + (Z_1 \cos \gamma - (Y_1 - h_a) \sin \gamma) \cos(\mu + \nu)] \sin \varphi + a_{\mu} - r_1 \right\} \cos \mu \\
 Z_5 &= -[Z_1 \sin \gamma + (Y_1 - h_a) \cos \gamma + h_a - (a_{\mu} - r_1)] \sin \varphi + \\
 &+ [-X_1 \sin(\mu + \nu) + (Z_1 \cos \gamma - (Y_1 - h_a) \sin \gamma) \cos(\mu + \nu)] \cos \varphi + S_0 \varphi
 \end{aligned} \tag{2}$$

Оптимизация эксплуатационных возможностей зуборезных станков по производительности и качеству нарезаемых колес связана, в первую очередь, с определением максимальной амплитуды сил резания и их изменением за период оборота инструмента.

Зная силы резания, можно определить не только мощность станка для обработки заготовки, но и необходимую жесткость отдельных его узлов, допустимую жесткость детали и применяемого приспособления.

Немалую роль играет определение сил резания и для расчета конструктивных параметров инструментов червячного типа.

При изучении процессов, происходящих при резании металлов, в частности динамики зубофрезерования, основной задачей является определение степени влияния различных факторов на составляющие силы резания.

Суммируя произведения удельной силы, возникающей на элементарном участке режущего лезвия получим значения составляющих силы резания:

$$P_z = \sum \Delta P_z \Delta l K_{cl} \cdot \cos(\beta + \omega), \tag{3}$$

$$P_y = \sum \Delta P_y \Delta l \cos(\alpha \mp \psi) K_{cl}; \tag{4}$$

$$P_x = \sum \Delta P_y \Delta l \sin(\alpha \mp \psi) K_{cl} \cdot \cos(\beta + \omega). \tag{5}$$

где: α – угол профиля инструмента;

“-” – входная кромка, “+” – выходная кромка.

Δl – элемент режущего лезвия (0,6 мм).

где K_{cl} – коэффициент, учитывающий сложность формирования стружки.

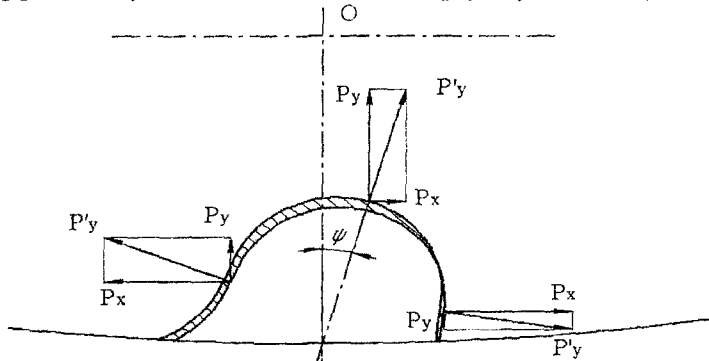


Рисунок – 2 Определение составляющих сил резания для передачи Новикова, при обработке червячными фрезами

В качестве примера приведены результаты расчета (в виде графиков) сил при резании червячной фрезой (модуль $m = 3$ мм; диаметр 112 мм; число зубьев фрезы $z_0 = 10$) зубчатого колеса (число

зубьев $z_1 = 30$). В начале производился расчет кинематического изменения углов и размеры срезаемого слоя, а затем составляющие силы резания.

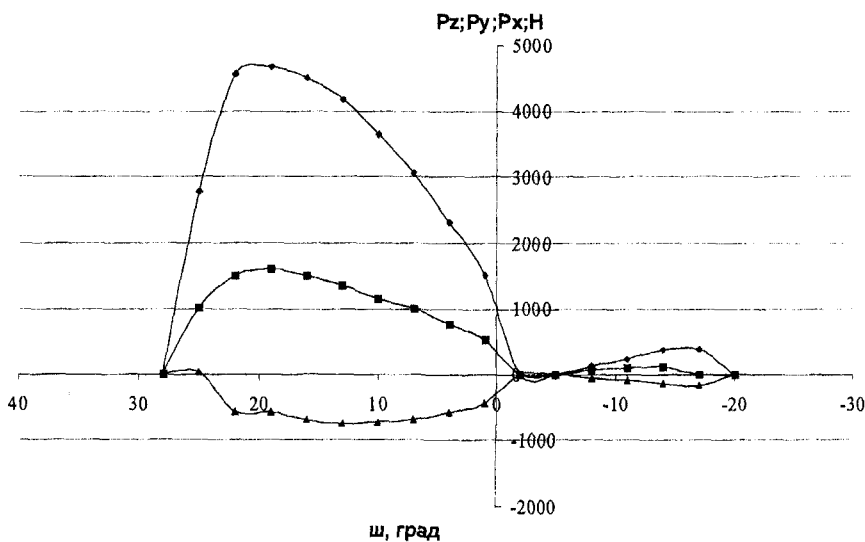


Рисунок – 3 Изменение составляющих силы резания для одного зуба
 $n_0 = 98$ об/мин; $S_0 = 3$ мм/об; $z_0 = 10$; $t = 3$ мм; $z_1 = 30$

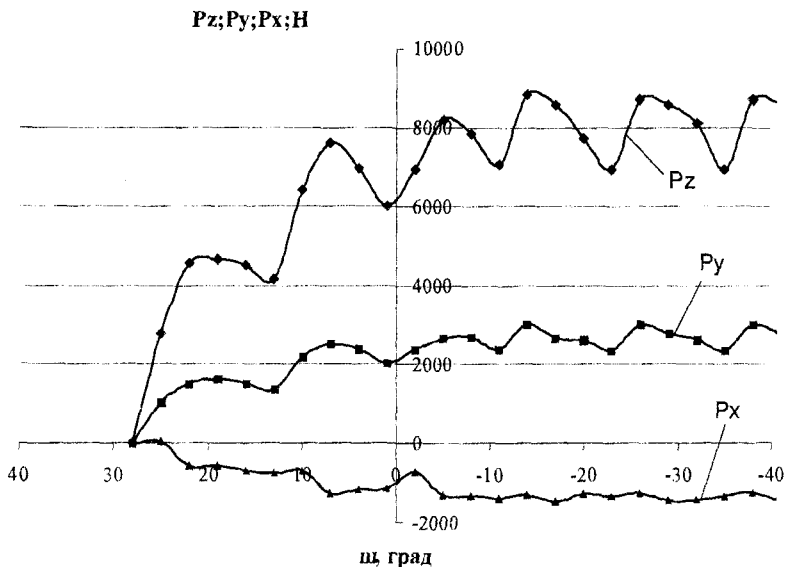


Рисунок – 4 Суммарное изменение составляющих силы резания
 $n_0 = 98$ об/мин; $S_0 = 3$ мм/об; $z_0 = 10$; $t = 3$ мм; $z_1 = 30$

Составляющая силы резания P_y оказывает прямое воздействие на отклонение межосевого расстояния и радиальное биение зубчатого венца, важнейшие параметры по которым оценивается точность обработанных зубчатых колес передачи Новикова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Короткин В.И. Зубчатые передачи Новикова. Достижения и развитие. [Текст] / В.И. Короткин, Н.П. Онишников, Ю.Д. Харитонов – М.: Машиностроение – 1, 2007. – 384 с.
- 2 Стеблецов Ю.Н., Тарапанов А.С. Разработка математического отображения схемы резания зубчатых колес передачи Новикова червячными фрезами [Текст].// Сборник трудов научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов, 2010 - с. 90-94.
- 3 Полохин О.В., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Разработка и анализ математического отображения кинематической схемы резания зубьев инструментами червячного типа [Текст] // Справочник. Инженерный журнал, 2000. – № 8. С. 11-14.

Стеблецов Юрий Николаевич

Орловский государственный технический университет
Магистрант
E-mail:stblecov@mail.ru

Тарапанов Александр Сергеевич

Орловский государственный технический университет
Доктор технических наук, профессор
Тел:(4862)45-18-84
E-mail:t:@ostu.ru

УДК 621.92

И.Л. ШУПИКОВ, С.Г. БИШУТИН

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И КАЧЕСТВО ПРОТЯЖЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОСЛЕ ЛЕПЕСТКОВОГО ШЛИФОВАНИЯ

Представлена конструкция и описан принцип функционирования нового оборудования для лепесткового шлифования протяженных цилиндрических поверхностей, а также результаты экспериментальных исследований процесса формирования высотных и шаговых параметров шероховатости указанных поверхностей.

Ключевые слова: лепестковое шлифование, шлифовальное оборудование, шероховатость поверхности, обработка протяженных цилиндрических поверхностей.

The design is presented and the principle of functioning is described of the new equipment for petal grinding of long cylindrical surfaces, and also results of experimental researches of process of formation high-rise and step-by-step parameters of a roughness of the specified surfaces.

Keywords: petal grinding, the grinding equipment, a surface roughness, processing of long of cylindrical surfaces.

Современный уровень развития науки и техники вызывает объективную необходимость расширения существующих границ качества деталей и металлообработки. Это может быть реализовано на основе создания новых высокоэффективных технологических процессов, нетрадиционного прогрессивного оборудования, оснастки и инструмента, позволяющих выпускать изделия с минимальными затратами и высокого качества [1].

Особое внимание необходимо уделить точности и качеству протяженных цилиндрических поверхностей деталей машин и оборудования, таких как грузонесущие штанги фрикционных подъемников; цилиндрические элементы протяженных рельсовых направляющих; цилиндрические валики текстильных машин; гидравлические плунжера и другие протяженные цилиндрические направляющие, используемые в авиационной, энергетической, металлургической и других отраслях промышленности.

В настоящее время на финишных операциях для обработки точных деталей из выше указанной группы объектов применяются круглошлифовальные, или бесцентрово-шлифовальные станки. Однако применение таких станков не исключает ряда недостатков, свойственных обработке протяженных цилиндрических поверхностей деталей.

Так, на круглошлифовальных станках, горизонтально расположенная в опорах заготовка, прогибается под действием собственного веса и шлифовального круга. Наиболее существенны прогибы длинных, нежестких заготовок. Поскольку прогиб заготовки по длине меняется, изменяется и толщина снимаемого шлифовальным кругом слоя металла. Это приводит к бочкообразности обработанной поверхности, снижению точности шлифования.

При обработке протяженных заготовок на бесцентрово-шлифовальных станках, горизонтально расположенная заготовка, имея опору на коротком своем участке, изгибается под действием сил тяжести. Прогиб заготовки приводит к изменению требуемого взаимного положения шлифовального, ведущего кругов и обрабатываемого участка заготовки. В результате изменяется толщина снимаемого слоя металла. Неизбежно появляется огранка, овальность, бочкообразность или корсетность обработанной поверхности.

В этой связи было спроектировано и изготовлено оборудование для лепесткового шлифования указанных поверхностей. Спроектированное оборудование (шлифовальный станок) позволяет методом продольного наружного круглого шлифования обрабатывать детали из различных материалов.

Шлифовальный станок (рисунок 1) представляет собой разборную раму, состоящую из основания 1, двух вертикальных стоек 2 таврового сечения и горизонтальной поперечины 3.

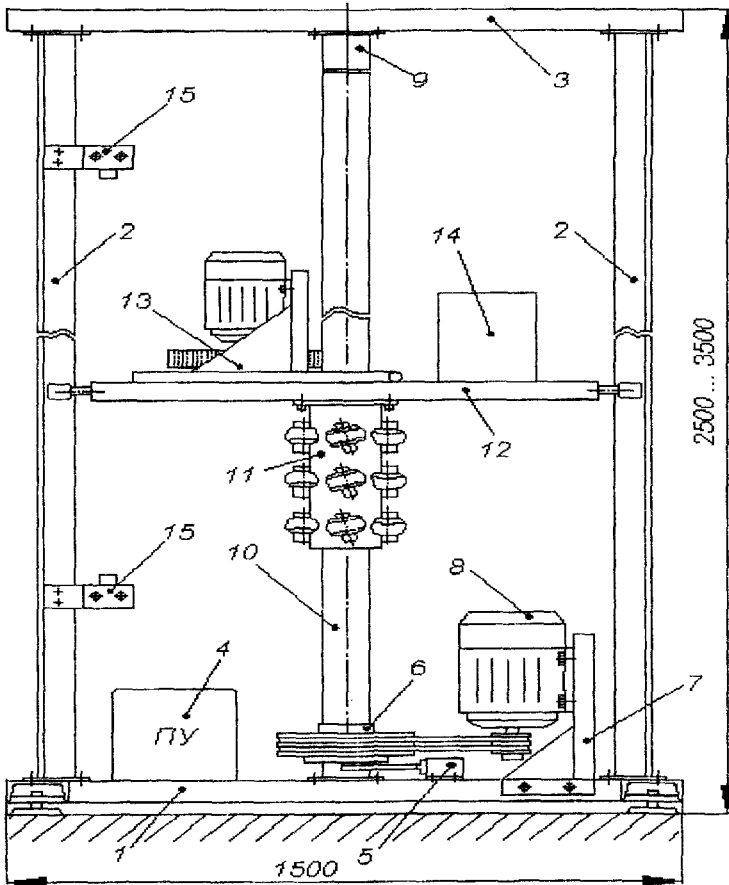


Рисунок 1 – Схема шлифовального станка

- 1 – основание; 2 – вертикальная стойка; 3 – горизонтальная поперечина; 4 – пульт управления; 5 – электродвигатель; 6 – нижняя цапфа; 7 – крепление; 8 – приводной электродвигатель; 9 – верхняя цапфа; 10 – обрабатываемая деталь; 11 – каретка; 12 – платформа; 13 – шлифовальный узел; 14 – противовес; 15 – конечный выключатель

Выполненное из швеллера основание рамы устанавливают на виброизолирующих опорах на фундаментном полу цеха или иного помещения, где планируется эксплуатация шлифовального станка. На основании рамы размещаются пульт управления 4, электротормоз 5, нижняя цапфа 6 с ведомым шкивом и нижним подшипниковым узлом и крепление 7, которое удерживает приводной электродвигатель 8 и одновременно служит для натяжения ремней механической передачи движения. Верхняя цапфа 9 вместе с верхним подшипниковым узлом закрепляются на горизонтальной поперечине. Вертикальные стойки, горизонтальная поперечина и основание соединены между собой при помощи болтов. Для повышения жесткости рамы станка устанавливаются растяжки между вертикальными стойками и основанием.

Обрабатываемая деталь 10 (грузонесущая штанга, цилиндрическая направляющая) закрепляется в цапфах. Каретка 11 представляет собой стальную трубу большего диаметра, чем обрабатываемая деталь, и содержит наклонно расположенные полиуретановые ролики. Каретка устанавливается на обрабатываемую деталь таким образом, чтобы полиуретановые ролики контактировали с поверхностью детали. Ролики находятся в специальных опорах, позволяющих регулировать угол их наклона, а также натяг, посредством которого обеспечивается выбор диаметра обрабатываемой детали из диапазона возможных диаметров. С кареткой 11 жестко связана платформа 12. По краям платформы, выполненной из уголка в виде прямоугольника, устанавливаются направляющие ролики, которые обеспечивают её движение без перекосов вдоль направляющих вертикальных стоек. На одном краю платформы размещается шлифовальный узел 13, а на другом – противовес 14, необходимый для уравновешивания платформы относительно ее оси. Для обеспечения промышленной санитарии рабочего помещения, целесообразно под шлифовальным узлом установить магнитный сепаратор, который улавливает металлическую стружку и абразивную пыль. На вертикальных стойках устанавливаются конечные выключатели 15. При контакте платформы с конечным выключателем происходит реверсивное вращение вала приводного электродвигателя, соответствующее направлению движения платформы.

Шлифовальный узел 13 включает в себя станину, основание шлифовального узла, электродвигатель и лепестковый круг. Основание шлифовального узла устанавливается на станину, которая располагается на платформе 12. Лепестковый круг закрепляется на валу электродвигателя, который крепится на основании шлифовального узла. Конструкция узла такова, что позволяет регулировать положение шлифовального инструмента относительно любой координатной оси и угла поворота вокруг нее.

Пульт управления 4 состоит из двух пускателей, кнопки пуска и кнопки выключения электрооборудования, теплового реле, лампочки-индикатора и частотного преобразователя. Питание приводного электродвигателя осуществляется от сети напряжением 380 V, а другого установленного электрооборудования – 220 V.

Станок работает следующим образом. Осуществляется питание пульта управления поворотом ручки рубильника электрощита, при этом загорается зеленая лампочка-индикатор. На частотном преобразователе задается частота питающей сети электродвигателя шлифовального узла, значение которой можно наблюдать на дисплее пульта управления. По градуированной таблице определяется скорость вращения лепесткового круга.

Нажатием кнопки «Пуск» на пульте управления во вращение приходит ведущий шкив приводного электродвигателя и одновременно лепестковый круг, закрепленный на валу другого электродвигателя. Через ременную передачу вращение от ведущего шкива передается к ведомому шкиву, установленному на нижней цапфе. Поскольку обрабатываемая деталь устанавливается в цапфах, то она начинает вращаться вокруг своей оси, а ролики каретки начинают обкатываться по её поверхности по винтовой линии. Установленная на обрабатываемой детали каретка и жестко связанная с ней платформа начинают перемещаться вертикально вдоль оси детали. В это же время вращается и шлифовальный круг, лепестки которого контактируют с поверхностью детали.

При достижении верхнего положения происходит контакт конечного выключателя и платформы, в результате чего приводной электродвигатель переключается на реверсивное

вращение, обрабатываемая деталь начинает вращаться в обратном направлении и платформа перемещается вниз. При этом лепестковый круг не меняет своей скорости и направления вращения. При достижении платформой нижнего положения срабатывает нижний конечный выключатель, изменяется направление вращения детали, и платформа снова перемещается вверх. Так происходит вращение обрабатываемой детали и перемещение платформы с установленным на ней шлифовальным узлом. В крайних положениях платформы (в момент реверса электродвигателя) мгновенно срабатывает электротормоз, который не позволяет обрабатываемой детали прийти в самопроизвольное вращение под действием сил тяжести шлифовального узла и противовеса. Описанная конструкция защищена патентом РФ на полезную модель [2].

На разработанном оборудовании был проведен ряд экспериментов. Для обработки заготовок из стали 45 диаметром 76 мм применяли лепестковые шлифовальные круги Ø200×32×50 различной зернистости производства ОАО «Белгородский абразивный завод» ГОСТ 22775-77, ГОСТ Р 52588-2006. На оборудовании было проведено более 60 экспериментов и около 400 измерений различных параметров качества поверхности. Параметры качества измерялись с использованием переносного профилометра Marsurf PS1. Результаты экспериментов сохранялись в памяти измерительного прибора, а затем через USB-интерфейс переносились на ЭВМ и подвергались статистической обработке. Отдельные результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Планы экспериментов и параметры качества шлифованных поверхностей

Скорость вращения шлифовального круга, м/с	Деформация лепесткового круга, мм	Зернистость круга по ГОСТ 2424-83	Параметры качества, мкм			
			Ra	Rp	Rmax	S
30	1,7	20	1,47	4,4	12,9	36,5
10	1,7	20	1,60	4,8	15,0	37,0
30	0,6	20	1,15	3,7	12,2	35,5
10	0,6	20	1,35	4,4	12,0	36,0
30	1,7	32	2,15	6,4	20,0	43,8
10	1,7	32	1,85	5,8	16,0	41,0
30	0,6	32	1,62	4,6	13,5	40,0
10	0,6	32	1,37	4,1	12,8	35,5
30	1,7	50	2,60	7,5	21,0	47,7
10	1,7	50	2,15	6,1	18,4	45,5
30	0,6	50	2,30	6,8	19,0	44,0
10	0,6	50	2,0	6,0	18,0	40,5

Анализируя результаты исследований, следует отметить, что наибольшее влияние на параметры шероховатости оказывает зернистость лепесткового шлифовального круга. Так, при увеличении зернистости с 20 до 50 параметр *Ra* увеличивается в 1,4 ... 2 раза, *Rmax* – в 1,2 ... 1,6 раза, *Rp* – в 1,3 ... 1,8 раза. Внутри каждой группы экспериментов с определенной зернистостью лепесткового шлифовального круга на исследуемые параметры качества поверхности в большей степени влияет деформация круга.

Проводились эксперименты по определению влияния скорости вращения круга на рассматриваемые параметры качества поверхности. Так, было обнаружено, что увеличение скорости вращения круга с мелкой зернистостью приводит к уменьшению шероховатости поверхности, а при более крупной зернистости шлифовальных кругов наблюдается обратная картина.

Было также выявлено, что зависимость параметров шероховатости от скорости вращения круга носит экстремальный характер, причем экстремум (минимум) функции смещается в сторону больших значений скорости вращения круга при уменьшении его зернисто-

сти. Результаты экспериментов по определению влияния скорости вращения круга на рассматриваемые параметры качества поверхности, проведенные на кругах зернистостью 32-Н с деформацией $\delta = 0,625$ мм представлены на рисунке 2.

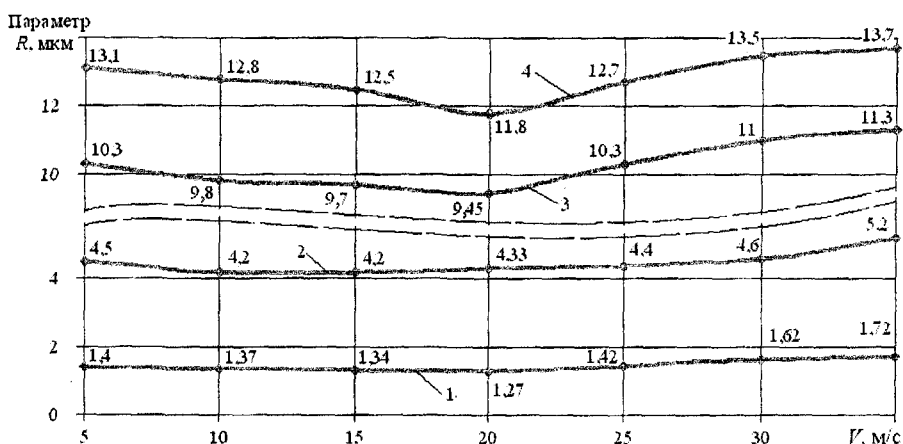


Рисунок 2 - Зависимости параметров шероховатости от скорости V вращения круга:
1 - Ra; 2 - Rp; 3 - Rz; 4 - Rmax

Из рисунка видно, что все кривые исследуемых параметров качества имеют экстремальный характер [3]. Это может быть объяснено изменением числа активных (образующих срезы) зерен круга и глубины их внедрения в обрабатываемую поверхность с ростом скорости вращения инструмента.

Как видно из рисунка 2, минимальное значение (экстремум) функции параметров Ra, Rmax и Rz наблюдается при скорости лепесткового шлифовального круга 20 м/с. Наиболее ярко экстремум наблюдается на зависимостях Rmax и Rz. Экстремум функции параметра Rp находится в диапазоне скоростей лепесткового шлифовального круга 10 ... 15 м/с.

Были проведены эксперименты по определению влияния времени работы лепесткового круга на параметры шероховатости поверхности. Эксперименты проводились на следующих режимах: скорость вращения лепесткового круга – 30 м/с, частота вращения заготовки – 250 об/мин, деформация лепесткового круга – 1,25 мм. Как видно из рисунка 3, с увеличением времени работы лепесткового круга параметр шероховатость Ra увеличивается. Аналогичные зависимости получены и для других параметров шероховатости. В проводимых экспериментах исходное значение параметров шероховатости поверхности соответствует нулевому значению времени.

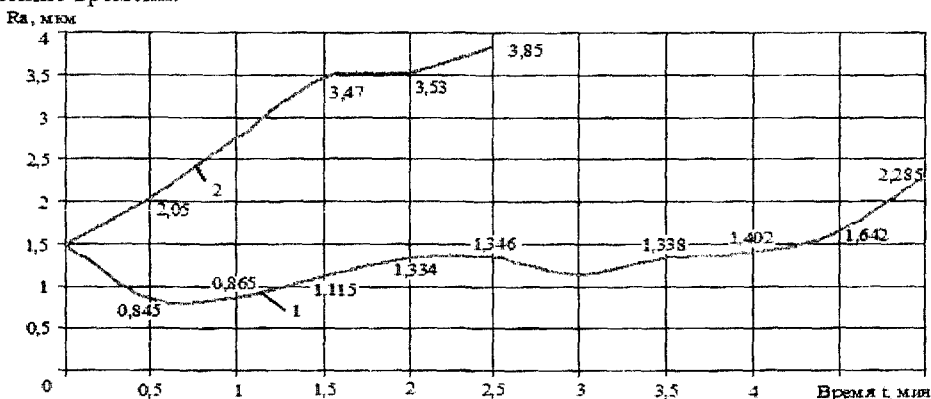


Рисунок 3 - Зависимость параметра Ra от времени работы лепесткового круга
1 - зернистость круга 20-Н; 2 - зернистость круга 40-Н

Проведенные исследования позволят обеспечить требуемые параметры качества протяженных цилиндрических поверхностей деталей в ходе лепесткового шлифования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Никифоров, А.Д. Современные проблемы науки в области технологии машиностроения / А.Д. Никифоров. – М.: Высш. шк., 2006. – 392 с.
- 2 Пат. RU 84 765 U1 B24B 5/100. Устройство для шлифования наружных протяженных цилиндрических поверхностей нежестких заготовок / Бишутин С.Г., Шупиков И.Л. – опубли. 20.07.09, Бюл. №20. – 3 с.
- 3 Гдалевич, А.И. Финишная обработка лепестковыми кругами / А.И. Гдалевич. – М.: Машиностроение, 1990. – 112 с.

Бишутин Сергей Геннадьевич

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Триботехнология»
г. Брянск, б-р 50-летия Октября, д. 7, кафедра «Триботехнология»
Тел. (4832) 58-82-79.

Шупиков Игорь Леонидович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Аспирант кафедры «Триботехнология»
г. Брянск, б-р 50-летия Октября, д. 7, кафедра «Триботехнология»
Тел. (4832) 58-82-79
E-mail: shupik-nauka@yandex.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.923.4

Л.Г. ВАЙНЕР

ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА ДВУСТОРОННЕГО ШЛИФОВАНИЯ ТОРЦОВ ДЕТАЛЕЙ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

На основе проведенных экспериментальных исследований установлена связь между показателями характеристик вращения роликов и точностью обработки. Предложена оптимальная форма характеристики вращения, которую следует использовать при настройке двусторонних торцешлифовальных станков и выборе технологических режимов шлифования.

Ключевые слова: *двустороннее торцешлифование, цилиндрический ролик, показатели характеристики вращения, точность обработки, настройка станка.*

On the basis of experimental research a connection between parameters of rotation characteristic and machining accuracy was traced. Optimal form of rotation characteristic was suggested. Given rotation characteristic should be used for two-side grinding machine tool setting and for grinding technological conditions choice.

Keywords: *double-disc grinding, cylindrical roller, parameters of rotation characteristic, machining accuracy, machine tool setting.*

Во многих исследованиях процесса двустороннего торцешлифования подчеркивается благоприятная роль вращения изделий в получении высокой точности обработки. В связи с этим появились многообразные схемы шлифования с принудительным вращением изделий посредством специальных приводов. Различные конструктивные варианты приспособлений для принудительного вращения роликов в зоне обработки применяются такими фирмами как SIM (Швейцария), RIV – SKF (Италия), Modler (Германия) и др. [1], но из-за конструктивной сложности, высоких требований к точности изготовления и регулировки направляющих элементов, а также из-за возникающего негативного явления отрыва роликов силами резания от базовых поверхностей загрузочного диска, наиболее распространенной схемой обработки в отечественном и зарубежном производстве остается традиционная наиболее простая схема шлифования роликов в отверстиях диска-сепаратора (Diskus-Werke (Германия), Dashio (Япония), отечественные подшипниковые заводы). Специфической особенностью процесса шлифования роликов во втулках загрузочного диска-сепаратора является принципиальная возможность их устойчивого вращения в процессе обработки, обусловленная тем, что ролик имеет свободу углового поворота относительно собственной оси в базировочной втулке

Вращение деталей позволяет интенсифицировать процесс шлифования, уменьшить количество необходимых для окончательной обработки проходов и вместе с тем минимизировать лимитирующую погрешность обработанных торцов – торцовое биение, поскольку в этом случае любое отклонение от перпендикулярности оси детали торцам кругов при приближенном рассмотрении вызовет погрешность не в виде биения, а в виде выпуклости, наследственное влияние которой на точность последующей операции бесцентрового шлифования незначительно.

В работах [2, 3] авторами на основе проведенных экспериментальных исследований выявлены закономерности движения роликов в зоне шлифования, предложены параметры и характеристики для описания переменного вращения ролика в процессе обработки, рассмотрено влияние отдельных технологических факторов на характеристики вращения роликов, установлено наличие связи между характеристиками вращения роликов и точностью обработки.

В настоящей работе рассматривается влияние показателей характеристик вращения (ХВ) роликов на точность обработки по параметру биения торцов.

На рис. 1 приведены типовые ХВ роликов $f_p(L)$ и отдельные показатели, их характеризующие (здесь f_p – частота вращения ролика, L – его текущая линейная координата).

К числу основных показателей ХВ роликов, которые связаны с выходными показателями точности обработки, относятся:

1) вид характеристики вращения (ХВ первого и третьего видов показаны на рис. 1а, второго вида – на рис. 1б);

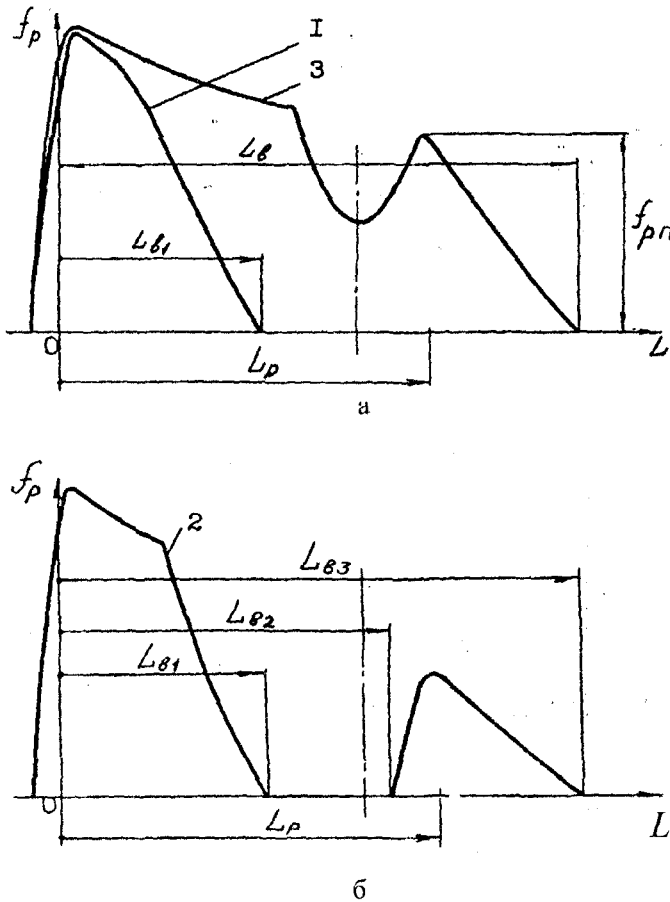


Рисунок 1 - Типовые характеристики вращения ролика и их показатели

- 2) длина участка вращения при его непрерывности L_B ;
- 3) суммарная протяженность участков, на которых ролик вращается со съемом припуска - L_B^P ;
- 4) максимальная частота вращения ролика после прохождения им центра зоны шлифования - f_{PP} ;

Параметр L_B^P определяется из сопоставления участков вращения роликов и участка съема припуска L_P :

$$\begin{aligned}
 L_B^P &= L_{B1} && \text{— для ХВ вида 1;} \\
 L_B^P &= L_{B1} + (L_P - L_{B2}) && \text{— для ХВ вида 2;} \\
 L_B^P &= L_P && \text{— для ХВ вида 3;}
 \end{aligned}$$

Для сравнительной оценки результатов, полученных при переменных параметрах процесса вводится относительный показатель $L^P_{B0} = L^P_B / L_P$, обозначающей часть зоны съема припуска, на которой происходит вращение ролика.

Результаты связи вида ХВ с торцовым биением при шлифовании роликов разных размеров на двух станках из гаммы двусторонних торцешлифовальных станков сведены в таблицу 1.

На рис. 2 приведена графическая иллюстрация связи вида ХВ с точностью обработанных торцов.

Таблица 1 – Результаты связи вида ХВ с торцовым биением

Вид ХВ	Интервал значений показателя L^P_{B0}	Значения погрешности обработки, мкм					
		Ролик 14x14 мм Станок 3342		Ролик 15x15 мм Станок 3343		Ролик 32x52 мм Станок 3343	
		Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон
1	0,1 – 0,6	11,2	6 - 25	11,8	5 - 32	13,4	6 - 28
2	0,3 – 0,8	6,3	4 - 11	5,1	3 - 8	5,3	4 - 8
3	0,8 – 1,0	2,6	1 - 5	3,0	1 - 5	2,9	1 - 6

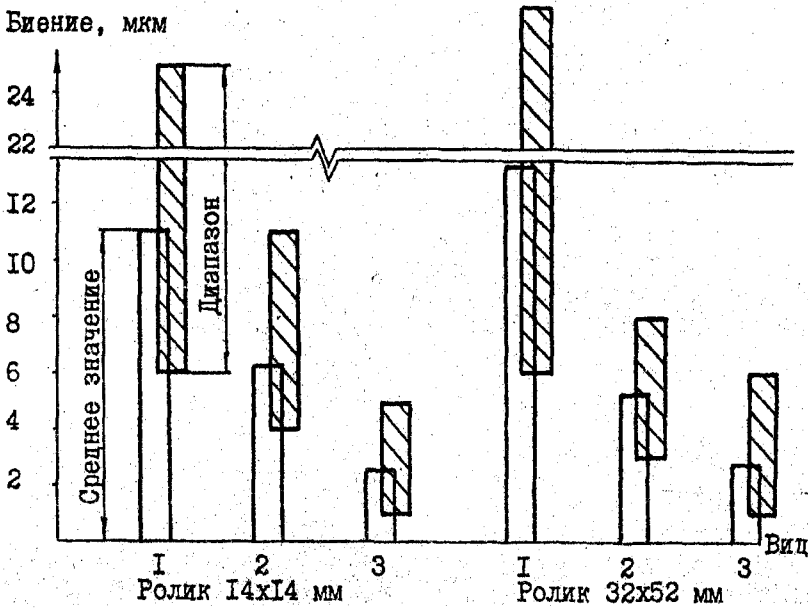


Рисунок 2 – Гистограммы точности обработки для разных видов ХВ

Следует отметить, что каждому виду ХВ соответствует свой диапазон и среднее значение погрешности обработки, а также свой интервал значений параметра L^P_{B0} . При ХВ третьего вида средние значения погрешности обработанных торцов приблизительно в 2 раза ниже чем при ХВ второго вида и в 4 раза ниже чем при ХВ первого вида.

Существенное влияние на точность обработки оказывает и относительный показатель суммарной протяженности участков, на которых ролик вращается со съемом припуска L^P_{B0} .

Связь L^P_{B0} с торцовым биением имеет экспоненциальный характер (Рис. 3) - с увеличением L^P_{B0} уменьшается величина погрешности торца, уменьшается и рассеяние.

Длина участка зоны шлифования, на котором происходит непрерывное вращение ролика L_B , также связана с точностью обработки (Рис. 4).

Зависимость биения Δ (мкм) ролика 14x14 мм от показателя L_B (мм) можно представить в виде уравнения регрессии ($L_B = 160-240$ мм)

$$\Delta = 6,57 - 0,019 L_B$$

Отсюда следует, что увеличение длины участка зоны шлифования, на котором происходит непрерывное вращение ролика L_B , от 160 до 240 мм приводит к повышению средней точности обработки в 1,8 раза.

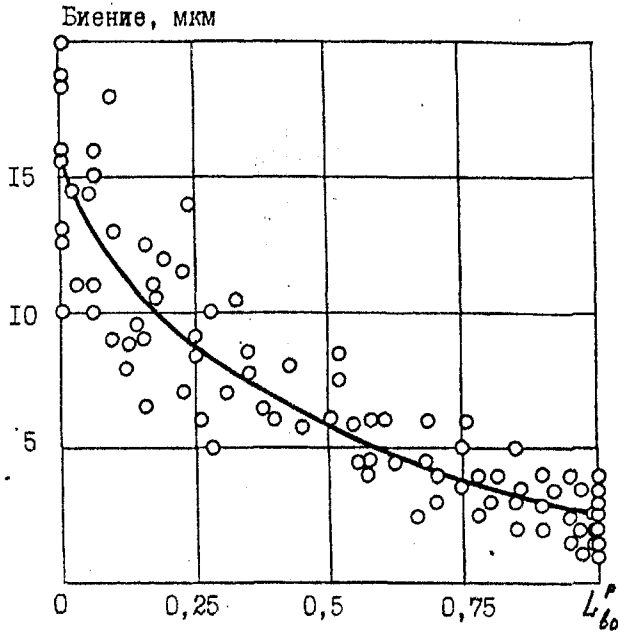


Рисунок 3 – Связь показателя L_{B0}^P с погрешностью обработанных торцов

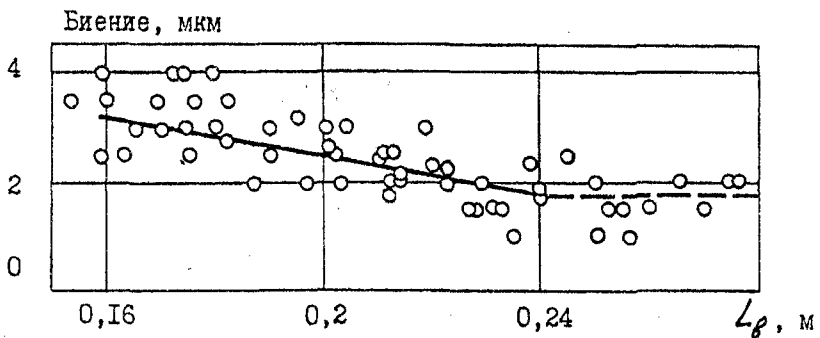


Рисунок 4 – Связь показателя L_B с погрешностью обработанных торцов

Рассмотрим причины образования различной по величине погрешности торцов при разных показателях характеристик вращения роликов.

При ХВ первого вида (им соответствуют малые значения L_{B0}^P) вращение прекращается в первой половине зоны шлифования на этапе интенсивного съема припуска. Из-за отсут-

ствия вращения торцы ролика полностью копируют режущий профиль шлифовальных кругов. В этом случае любые отклонения от перпендикулярности оси ролика рабочим торцам шлифовальных кругов (вызванные геометрической неточностью изготовления и сборки станка или случайными перекосами ролика в базировочной втулке), а также собственная кривизна режущей поверхности круга обуславливает появление погрешности обработки в виде торцового биения.

При ХВ второго вида (им соответствуют средние значения L_{B0}^P) после остановки ролика вращение возобновляется и частично исправляет образованное при $f_p = 0$ отклонение от перпендикулярности поверхностей торцов ролика его оси. Но, как правило, на участке второго вращения после прохождения центра зоны шлифования снимается малый припуск 1 – 6 мкм, меньший по абсолютной величине имеющейся в этот момент погрешности торца, поэтому полного исправления погрешности не происходит.

При ХВ третьего вида и значениях L_{B0}^P близких к 1 в полной мере обнаруживается благоприятная роль вращения ролика вокруг своей оси в процессе формообразования.

Причины влияния параметра L_B на торцовое биение при ХВ третьего вида и $L_B > L_P$ следует искать в том, что, когда ролик входит в расширяющуюся часть зоны шлифования, и съем припуска номинально завершен, возможно периодическое контактирование ролика с торцами кругов, например, из-за их осевого биения. Это может повлечь за собой локальные микросъемы на отдельных частях торца ролика и образование дополнительной погрешности в виде биения в том случае, если ролик на этом этапе уже не вращается. Поэтому чем большую часть зоны шлифования ролика сопровождается вращением, тем меньше вероятность образования данной погрешности.

Условие минимизации торцового биения

$$L_B > L_3,$$

где L_3 – общая длина круговой траектории движения ролика в зоне шлифования.

Увеличение параметра $f_{рп}$ при одинаковых условиях торможения ролика влечет за собой соответствующее увеличение L_B , поэтому влияние $f_{рп}$ на биение обработанных торцов аналогично рассмотренной связи биения с L_B .

В результате анализа связи показателей ХВ с точностью обработки можно описать форму ХВ, при которой обеспечивается наивысшая для заданных условий шлифования точность обработки. ХВ оптимальной формы – это ХВ третьего вида с непрерывным вращением на участке съема припуска ($L_{B0}^P = 1$), с параметром $L_B > L_3$, с провалом кривой симметричным относительно центра зоны и максимальным значением $f_{рп}$. Такая форма кривой ХВ должна служить эталоном при настройке двусторонних торцешлифовальных станков с целью получения наивысшей для заданных условий шлифования точности обработки по параметру торцового биения.

Оптимальная форма ХВ достигается рациональным выбором таких технологических параметров как углы наклона шлифовальных кругов в горизонтальной и вертикальной плоскостях, снимаемый припуск и скорость подачи деталей, влияние которых на показатели ХВ подробно рассмотрено в работе [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Зарецкий А. В., Гандельсман В. Б., Шахновский С. С. Исследование процесса двустороннего шлифования торцов цилиндрических роликов железнодорожных подшипников с принудительным вращением. - В кн.: Технологическое обеспечение повышения качества подшипников. Труды института, №1 (87). М., Специнформцентр ВНИИПа, 1976, с.91-104.
- 2 Вайнер Л. Г. Исследование характера движения цилиндрических роликов при обработке на двусторонних торцешлифовальных станках. – Известия ОрёлГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные вопросы техники и технологии». - 2010. - № 4.
- 3 Вайнер Л. Г., Шахновский С. С. Повышение точности шлифования торцов ролика. – Станки и инструмент, 1985, №5, с. 31-32.

Вайнер Леонид Григорьевич

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой начертательной геометрии и машинной графики

Тел. (4212)-22-43-83

E-mail: val@mail.khstu.ru

lgvainer@mail.ru

УДК 621.001.4

А.О. ГОРЛЕНКО, А.Н. ЕРОХИН

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Описаны испытания подшипников скольжения на триботехнической установке для определения влияния различных технологических методов и режимов обработки на износостойкость цилиндрических поверхностей трения деталей машин.

Ключевые слова: подшипники скольжения, трение, изнашивание, испытания, нагрузка.

Tests of bearings of sliding on tribotехнической to installation for definition vliya-niya various technological methods and processing modes on wear resistance cylindrical poverhno-stej friction of details of cars are described.

Key words: sliding bearings, a friction, wear process, tests, loading.

Научно-технический прогресс и эффективность производства машин и механизмов определяются уровнем развития машиностроения. Комплексная механизация и автоматизация, прогрессивные технологии, новые материалы позволяют повысить технический уровень, ресурс и надежность современной техники, ускорить выпуск новых поколений машин и технологического оборудования для их обслуживания и ремонта. В связи с этим возникает необходимость обеспечения и повышения износостойкости подшипниковых узлов трения как основных элементов изделий машиностроения в целом.

Вопросу контакта твердых тел при трении с точки зрения макрофизики посвящено достаточно большое количество работ. Ввиду сложности процессов, протекающих в поверхностных слоях твердых тел при изнашивании, различия условий и режимов работы узлов трения и причин изнашивания невозможно предположить строгие единые классификационные признаки всего многообразия процессов изнашивания. Поэтому каждому процессу присущ свой вид изнашивания.

К важнейшим критериям обеспечения и повышения износостойкости для большинства типов подшипников относится прочность, жесткость, смазываемость, теплостойкость, виброустойчивость, коррозионная стойкость, точность и др. Величина изнашивания контактирующих деталей подшипников определяет срок их службы. Поэтому изучение природы трения и изнашивания, а также разработка мероприятий по повышению износостойкости и работоспособности деталей подшипников имеют большое практическое значение.

Несмотря на известность методики проведения триботехнических испытаний подшипников скольжения, им присущи существенные недостатки, в частности невозможность отследить динамику изнашивания. Для определения величины износа подшипники необходимо снимать с устройства, разбирать и тщательно промывать. В связи с этим был разработан и изготовлен стенд, позволяющий оценить характер и интенсивность изнашивания непосредственно в процессе проведения испытаний (рисунк 1) [1].

Вращение от электродвигателя через пальцевую муфту передается валу, на котором установлены подшипники. По мере изнашивания происходит перемещение корпуса одного из подшипников вслед за внутренним наружным кольцом под действием нагрузки, установленной на тяге, а вместе с ним и шупа индуктивного датчика, касающегося поверхности корпуса. Информация с датчика обрабатывается программной средой. Такой метод позволяет провести комплексную сравнительную оценку износостойкости подшипников под влиянием, например, такого параметра, как смазочный материал, и выявить из имеющихся наиболее подходящий для заданных условий работы. Коэффициент трения косвенно оценивается по выбегу с помощью электронного счетчика оборотов, работающего автоматически. Для регистрации момента трения монтируется тензобалка.

Данная установка подключается через соответствующие периферийные устройства к ПЭВМ. Структурная схема представлена на рисунке 2.

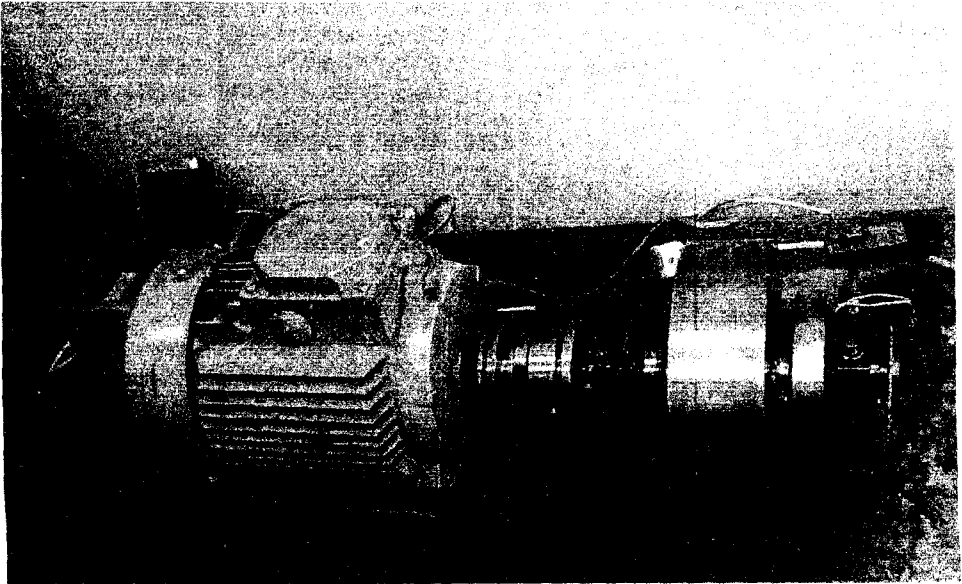


Рисунок 1 - Установка триботехнических испытаний подшипников скольжения

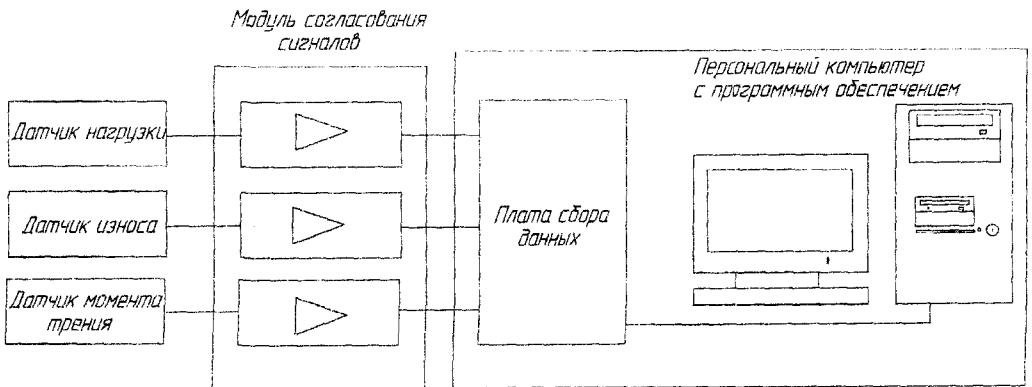


Рисунок 2 - Структурная схема подключения к ПЭВМ

Система позволяет контролировать и обрабатывать в реальном времени следующие параметры испытания: нагрузку на образцы, момент трения, суммарный линейный износ [2,3]. Для этой цели используются соответствующие датчики, усилители, плата сбора данных, программное обеспечение.

Для реализации метода испытаний на базе серийной машины трения МИ-1М создана автоматизированная система научных исследований (АСНИ) с учетом современных требований к измерительным системам, изложенных в соответствующих нормативных документах [4].

Программное обеспечение АСНИ разработано в среде программирования NI LabVIEW 7. Программа содержит модули ввода исходных данных, тарировки датчиков и установки нуля, обработки и визуализации данных и обеспечивает отображение на мониторе измеряемых параметров (нагрузки, коэффициента трения, линейного износа образца, температуры смазочного материала, пути трения) в виде графиков в реальном времени. После испытаний автоматически генерируется отчет в формате HTML и создается ячейка в единой базе данных, которая включает набор данных, сформированных с учетом ГОСТ 30858-2003: исходные параметры эксперимента, максимальные и средние значения интенсивности изнашивания ($i_{h_{max}}^0, i_h^0$), коэффициента трения (f_{max}^0, f^0) и температуры (T_{max}^0, T^0) в период приработки, средние значения интенсивности изнашивания (i_h), коэффициента трения (f) и температуры (T) в период нормального изнашивания, общий путь трения (L) и путь приработки (L^0), а также симплексы $\left(\frac{i_h}{i_h^0}, \frac{f}{f^0}, \frac{T}{T^0}, \frac{L^0}{L} \right)$.

Следует отметить потенциальную возможность базирования разработанной АСНИ на любой установке, имеющей привод, при устройстве соответствующего датчика момента или силы трения и проведении уточненных расчетов

Основной функцией системы сбора данных в АСНИ является регистрация поступающих с датчиков сигналов. Она включает мобильный измерительный комплекс, систему согласования SC-2345 и плату сбора данных M-серии PCI 6220 производства компании National Instruments.

Рассмотренный метод позволяет проводить испытания и определять влияние различных технологических методов и режимов обработки на износостойкость цилиндрических поверхностей трения деталей машин. Данный метод может быть использован для создания и постоянного пополнения базы данных по технологическому обеспечению износостойкости поверхностей трения деталей машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Горленко А. О., Ключников М.Л. Триботехнические испытания подшипников скольжения / Наука и производство 2009: материалы Международной научно-практической конференции.: в 2 ч. под ред. С. П. Сазонова, П. В. Новикова.- Брянск: БГТУ, 2009. – ч 2. – с. 22-23.
- 2 Прудников М.И. Метод триботехнических испытаний цилиндрических поверхностей трения. - Вестник БГТУ. - 2008. - № 2 (18). - С. 48-56.
- 3 Горленко А.О., Прудников М.И. Триботехнические испытания поверхностей деталей нормализованным методом / Справочник. Инженерный журнал. Приложение. - 2009. - №10. - С. 22- 24.
- 4 Гуртовцев А.Л. Метрология цифровых измерений / Современные технологии автоматизации. - 2008. - №1. - С. 66-74.

Горленко Александр Олегович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Триботехнология»

Тел. (4832) 58-82-79

E-mail: trt@tu-bryansk.ru

Ерохин Александр Николаевич

Брянский государственный технический университет, г. Брянск

Соискатель кафедры «Триботехнология»

Тел. (4832) 58-82-79

E-mail: trt@tu-bryansk.ru

УДК 69.059.324.5 - 219.3: 69.056.53

В.И. КОНОПЛЕВ, В.И. АНУФРИЕВ, С.В. АНУФРИЕВ, А.Б. КУРЕНЕВ

УСТРОЙСТВО ДЛЯ УСТАНОВКИ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ В ПРОЕКТНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Рассмотрено устройство, используемое для временного закрепления и установки в проектное положение стеновых панелей при монтаже крупнопанельных зданий. Предлагаемое устройство позволяет снизить трудоемкость установки и снятия подкоса, по сравнению с инвентарными приспособлениями, применяемыми при закреплении стеновых панелей.

Ключевые слова: подкос, захват, штанга, муфта.

The device used for time fastening and installation in design position of panels of walls at installation of large-panel buildings is considered. The offered device allows to lower labour input of installation and removal of basic cores, in comparison with the inventory adaptations applied at fastening of panels of walls.

Keywords: basic core, capture, bar, clutch.

Временное крепление стеновых панелей при монтаже крупнопанельных зданий инвентарными приспособлениями малоэффективно. Предложен подкос для временного закрепления стеновых панелей (а.с. 998707 СССР), включающий штангу со стяжным устройством, нижние и верхние захваты, закрепленных на штанге. Расчет штанги подкоса необходимо проводить из условия прочности и устойчивости от ветровой нагрузки. Использование устройства позволит снизить трудоемкость установки и снятия подкоса по сравнению с вышеуказанными приспособлениями. Данное изобретение внедрено в производство.

При монтаже крупнопанельных зданий широко используются инвентарные приспособления для временного закрепления в проектное положение стеновых панелей.

Недостатком таких приспособлений является невозможность быстрого производства монтажа панелей.

Рассмотрен подкос для временного закрепления стеновых панелей, обеспечивающий снижение трудоемкости при монтаже [1].

На рисунке 1 представлен общий вид подкоса для временного закрепления стеновых панелей; на рисунке 2 – вид А на подкос и сечение подкоса Б-Б в зоне соединительной муфты: а – схема устройства верхнего захвата подкоса; б – схема соединения муфтой штанги и свободных концов верхнего захвата клещей.

Подкос состоит из штанги 3 со стяжным устройством 2 и нижнего 1 и верхнего 4 захватов, закрепленных на штанге 3. Верхний захват выполнен в виде клещей 11 с рабочими 12 и свободными 9 концами. Свободные концы 9 расположены в пазу штанги 3, подпружинены пружиной 8, снабжены упорами 6 и 10 и шарнирно закреплены на штанге 3 с помощью телескопически соединенных труб 5 и 13, проходящих через штангу. На свободные концы 9 клещей посажена муфта 7 с внутренними выступами 17, входящими в паз штанги. Муфта 7 соединена тягами 14 с ползуном 15, снабженным стопорами 16.

Для разъединения захвата оттягивают стопоры 16 в стороны и перемещают ползун 15 с тягами 14 и муфтой 7 вдоль штанги вверх.

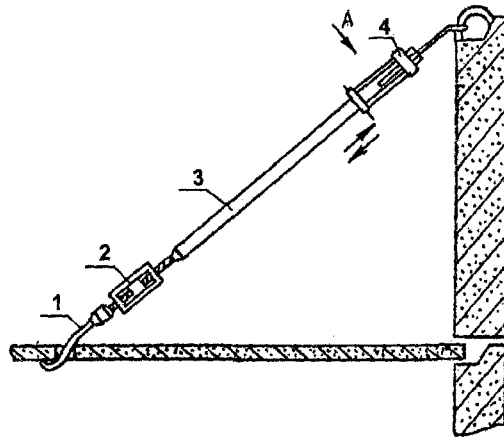


Рисунок 1 – Подкос для временного закрепления стеновых панелей (общий вид)

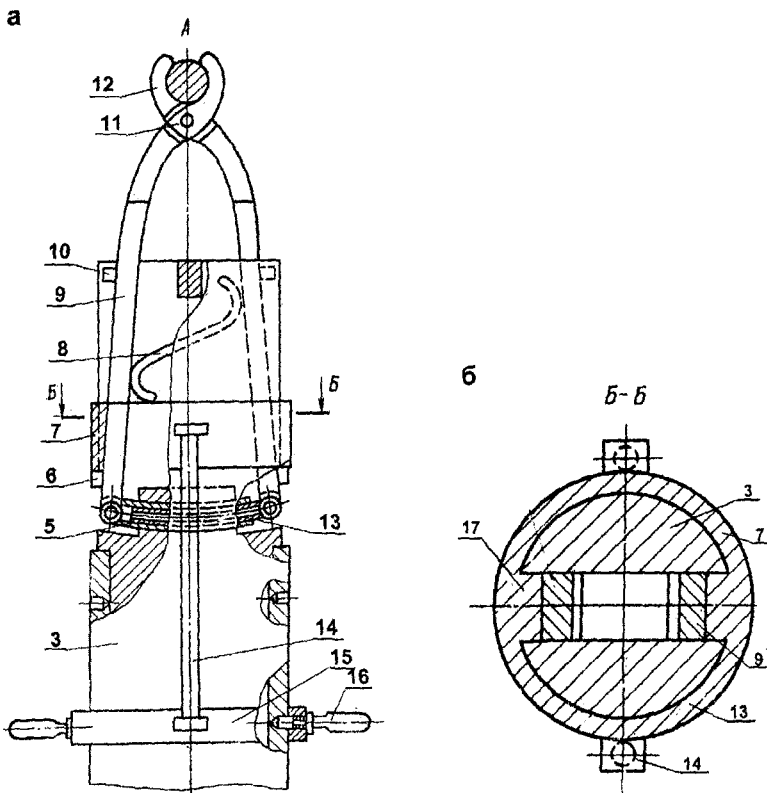


Рисунок 2 – Подкос для временного закрепления стеновых панелей:
 а – схема устройства верхнего захвата подкоса; б – схема соединения муфты штанги и свободных концов верхнего захвата клещей;
 1,4 – захваты; 2 – стяжное устройство; 3 – штанга; 5, 13 – трубы;
 6,10 – упоры; 7 – муфта; 8 – пружина; 9,12 – свободные и рабочие концы клещей; 11 – клещи; 14 – тяга; 15 – ползун; 16 – стопор; 17 – выступ

В результате этого свободные концы 9 клещей 11 с помощью пружины 8 расходятся, и при достижении муфтой упора 10 срабатывает стопор 16, рабочие концы 12 клещей 11 расходятся и освобождают захват от нетли.

Расчет сжатых (растянутых) элементов подкосов необходимо производить из условия прочности и устойчивости от ветровой нагрузки (рисунок 3).

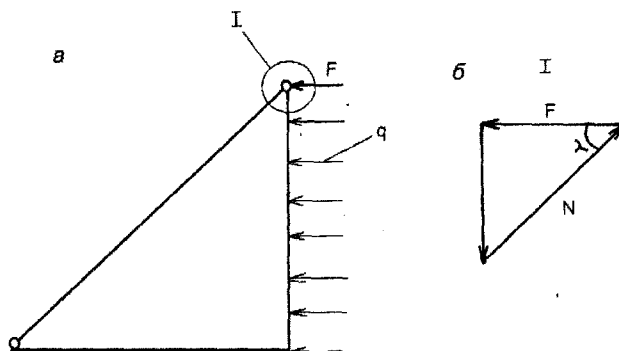


Рисунок 3 – Расчетная схема подкоса для временного закрепления стеновых панелей:

а – ветровая нагрузка, действующая на стеновую панель;
б – графическое определение усилия в штанге подкоса от действия ветровой нагрузки

Ветровая нагрузка (ГОСТ 1451 – 77) вызвана давлением ветра на стеновые панели, которую воспринимают подкосы. При расчетах учитывают статическую составляющую этого давления.

Ветровая нагрузка определяется по формуле [2]:

$$F = q k c n A,$$

- где q – динамическое давление ветра, МПа;
 k – коэффициент, учитывающий изменение динамического давления по высоте;
 c – коэффициент аэродинамической силы (аэродинамический коэффициент);
 A – расчетная площадь стеновой панели, м²;
 n – коэффициент перегрузки крана, равный для нерабочего состояния крана $n = 1,1$;
 для рабочего – $n = 1,0$.

Значения q соответствуют давлению и температуре воздуха соответственно 0,1 МПа и 15°С.

Расчетные сопротивления металлоконструкций из проката или труб для различных видов напряженного состояния и в зависимости от коэффициента неоднородности материала γ_m при растяжении-сжатии:

$$R_y = R_{yn} / \gamma_m,$$

где R_{yn} – предел текучести стали разрыву.

При расчете на прочность элементов металлоконструкций, подверженных центральному растяжению или сжатию под действием силы N , следует выполнять следующее условие:

$$\frac{N}{A_H} \leq R_y \gamma_c,$$

Где A_H – площадь сечения элемента с учетом местных ослаблений, м²;
 γ_c – коэффициент условий работы металлоконструкций.

При расчете на устойчивость сплошностенчатых элементов, нагруженных центральной силой N , следует выполнять следующее условие:

$$\frac{N}{\varphi A_{бр}} \leq R_y \gamma_c,$$

Где $A_{бр}$ – площадь сечения элемента без учета местных ослаблений, м²;
 φ – коэффициент устойчивости (снижения расчетного сопротивления при центральном сжатии).

Значения φ принимают по данным СНиП 11-23-81 или по рисунку 4 с учетом расчетного сопротивления материала и гибкости элемента

$$\lambda_{ef} = \frac{l_{ef}}{i},$$

Где l_{ef} – расчетная длина элемента, м;
 i – радиус инерции сечения элемента, м.

Для элементов трубчатого сечения при $\lambda_{ef} < 95 \dots 115$ значения φ следует умножить на поправочный коэффициент k , определяемый по рисунку 4.

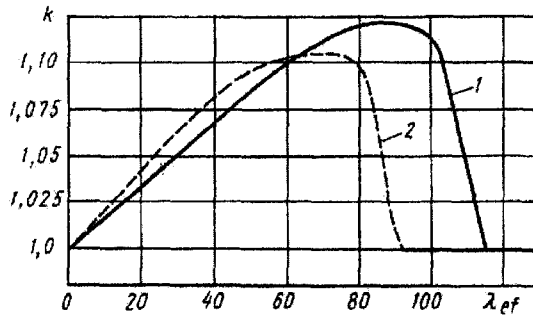


Рисунок 4 – Поправочный коэффициент φ для трубчатых элементов:

1 – при $R_y = 200 \dots 240$ МПа; 2 – при $R_y = 280$ МПа

При определении l_{ef} следует учитывать характер изменения сечения элемента по его длине, а также степень податливости концевых креплений элемента.

Использование устройства позволит снизить трудоемкость установки и снятия подкоса, по сравнению с инвентарными приспособлениями, применяемыми при закреплении стеновых панелей.

ЛИТЕРАТУРА

1 А. с. № 998707 Российская Федерация, МПК В65Д 88/70. Подкос для временного закрепления стеновых панелей / Коноплев В. И., Шестаков В.А., Конов А.Г., Петров В.И.; заявитель и патентообладатель Тульск. гос. ун-т. – № 3304244/29; заявл. 19.06.81; опубл. 23.02.83, Бюл. № 7, – 3 с.

2 Абрамович И.И, Березин В.Н., Яуре А.Г. Грузоподъемные краны промышленных предприятий: справ. М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.

Коноплев Василий Иванович

Тульский государственный университет, г. Тула

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование»

Тел. (4872) 33-22-88

E-mail: konoplev@tsu.tula.ru,

Ануфриев Валерий Иванович

Тульский государственный университет, г. Тула

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование»

Тел. (4872) 33-22-88

E-mail: anufriev@tsu.tula.ru,

Ануфриев Сергей Валерьевич

Тульский государственный университет, г. Тула

Аспирант кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование»

Тел. (4872) 33-22-88

E-mail: anufriev@tsu.tula.ru,

Курнев Александр Борисович

Тульский государственный университет, г. Тула

Студент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование»

Тел. (4872) 33-22-88

E-mail: kurenev@tsu.tula.ru

УДК 621.89

В.П. МАТЛАХОВ

МОДЕРНИЗАЦИЯ МАШИНЫ ТРЕНИЯ МИ-1М ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ В УСЛОВИЯХ СМАЗЫВАНИЯ АБРАЗИВНО-МАСЛЯНОЙ СМЕСЬЮ

Представлено разработанное и изготовленное оборудование на базе серийной испытательной машины трения МИ-1М для реализации испытаний наружных поверхностей трения в условиях смазывания с добавлением абразивных частиц.

Ключевые слова: триботехнические испытания, машина трения, абразивно-масляная смесь, абразивные частицы.

Developed and made equipment on the basis of the serial test machine of the friction MI1-M for realization of tests outer surfaces of friction in conditions of greasing with addition of abrasive particles is submitted.

Keywords: tribotechnical tests, the machine of friction, abrasive- oleaginous mixture, abrasive particles.

Широкая номенклатура деталей транспортного, сельскохозяйственного, дорожного, строительного машиностроения в процессе эксплуатации подвергаются тяжелым нагрузкам в условиях граничной смазки и абразивного изнашивания. Следовательно, условия испытаний для данной группы деталей должны быть наиболее приближены к реальным условиям в период их эксплуатации.

Для испытаний с целью оценки износостойкости подвижных соединений наиболее часто используется серийная испытательная машина трения МИ-1М, воспроизводящая кинематический тип сопряжения «вал-колодка», «вал-втулка».

Для испытаний с применением абразивно-масляной прослойки используют абразивный материал, приготовленный из кварцевого песка, соответствующего требованиям ГОСТ 2138-84, и индустриальное масло 20А (ГОСТ 20799-88).

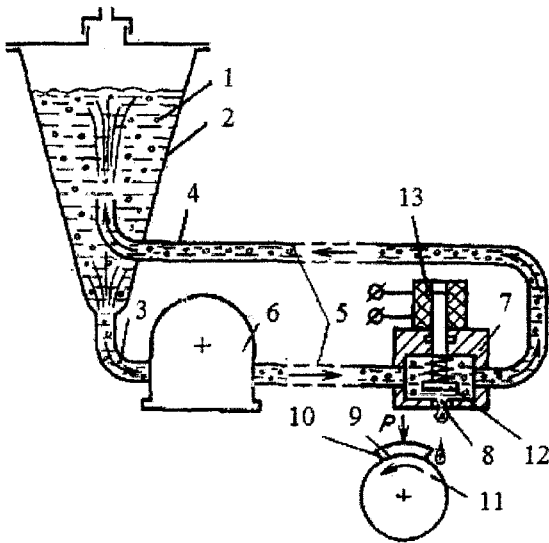


Рисунок 1 - Схема устройства для получения и подачи в зону трения абразивно-масляной взвеси (ГОСТ 23.224-86)

тельно включен насос (6), приводимый в движение электродвигателем (на схеме не показан) и перекачивающий взесь (1) по магистрали (5). Насос не должен разрушать абразивные частицы и интенсивно изнашиваться. Рекомендуются насосы объемного действия для агрессивных сред или бензонасосы для карбюраторных двигателей. В напорную часть магистрали (5) последовательно включен двумя ходами трехходовой элемент (7), установленный на машине трения (на схеме не показана). Третий ход (8) трехходового элемента (7) расположен над зоной трения (9) испытуемых деталей (10) и (11), сжимаемых силой Р. Этот ход снабжен электроуправляемым клапаном (12), который открывается при подаче напряжения на обмотку электромагнита (13) и пропускает порцию суспензии к зоне трения (9) (рис. 1).

Во 2-й схеме суспензия вытекает под действием собственного веса [2]. Сущность метода также состоит в изнашивании образцов из исследуемых материалов по контробразцу с одновременной дозированной подачей в зону трения абразивно-масляной суспензии. Для проведения испытаний используется устройство, обеспечивающее автоматическую дозированную подачу суспензии в зону трения (рис. 2).

В данном варианте взвешивание частиц песка в масле происходит не из-за непрерывной

Рассмотрим два варианта реализации процесса перемешивания абразива до равномерного взвешенного состояния в индустриальном масле. В 1-й схеме вытекание суспензии обеспечивается давлением, нагнетаемым насосом [1]. Для сравнительных экспресс-испытаний (группа А) с абразивно-масляной прослойкой по оценке интенсивностей изнашивания исследуемой и эталонной поверхностей рекомендовано принципиальное описание устройства для получения и подачи в зону трения абразивно-масляной взвеси (рис. 1).

Абразивно-масляная взесь (1) с заданной концентрацией абразивных частиц находится в резервуаре (2). К резервуару (2) всасывающим (3) и напорными (4) концами подсоединена магистраль (5), выполненная в виде замкнутого контура. В магистраль (5) последова-

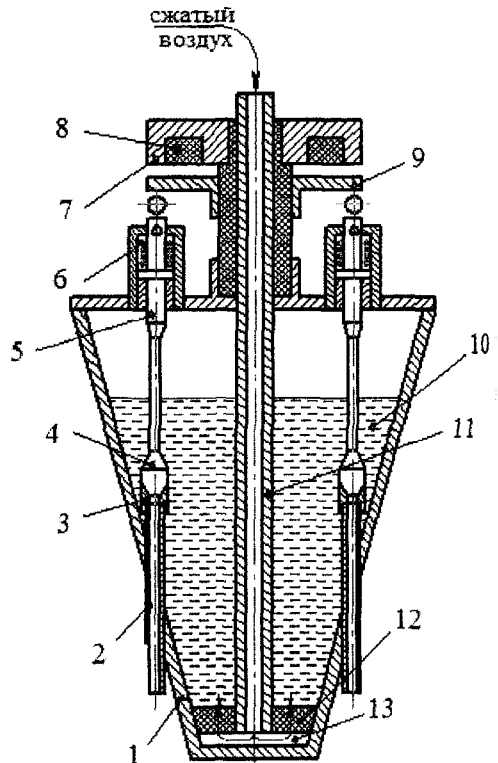


Рисунок 2 - Схема устройства для получения подачи в зону трения абразивно-масляной взвеси (РД 50-339-82):

1-корпус; 2-трубка; 3-насадка; 4-клапан; 5-толкатель; 6-пружина; 7-неподвижная часть электромагнита; 8-токовая катушка; 9-неподвижный якорь; 10-смесь абразива и масла; 11-трубка для подачи сжатого воздуха; 12-полупроницаемая перегородка; 13-полость

циркуляции смеси по замкнутому контуру, а вследствие реализации процесса бурления за счет восходящего со дна потока сжатого воздуха от компрессора, который поступает в емкость по трубке (11) и благодаря полупроницаемой перегородке равномерно распределяется. Обе схемы предполагают дозированную подачу суспензии. Это обеспечивается применением электромагнитных клапанов, принцип действия которых заключается в следующем (рассмотрим на примере 2-й схемы). В токовую катушку (8) неподвижной части электромагнита (7) подается импульс тока, под действием которого якорь (9), преодолевая действие пружин (6), притягивается к неподвижной части магнита и поднимает клапаны (4), открывающие отверстия насадок (3) для поступления суспензии (10). Продолжительность импульса тока, а следовательно, и разовую подачу абразивно-масляной суспензии устанавливают с помощью реле времени. При отсутствии тока клапаны (4) под действием пружин (6) перекрывают отверстия насадок (3).

Реализация 1-й схемы предполагает наличие электродвигателя, приводящего в движение клапан насоса, что значительно усложняет конструкцию и увеличивает себестоимость 1-го устройства по сравнению со 2-м при ориентировочно одинаковой эффективности перемешивания. Во 2-й же схеме достаточно расположить насадки и систему выводных трубок над парой трения для обеспечения беспрепятственного вытекания взвеси.

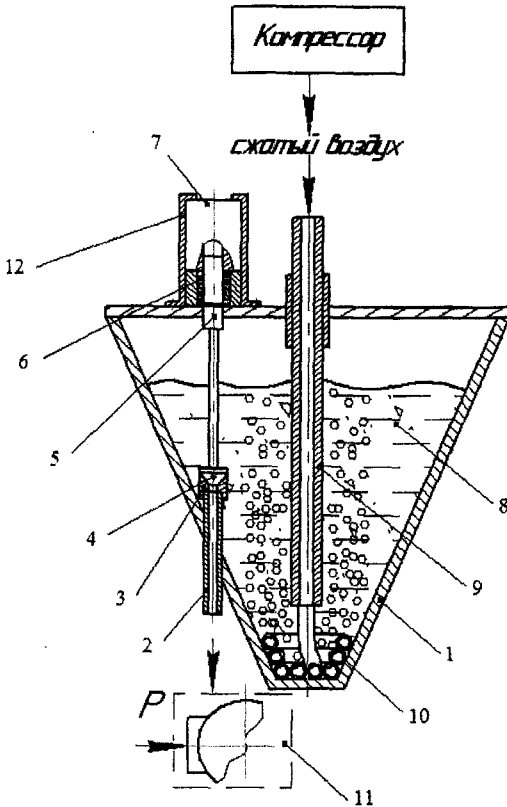


Рисунок 3 - Схема устройства для получения и подачи в зону трения абразивно-масляной взвеси:

1-корпус; 2-трубка; 3-насадка; 4-клапан; 5-толкатель; 6-пружина; 7-электромагнит; 8-смесь абразива и масла; 9-трубка для подачи сжатого воздуха; 10-проницаемая трубка для выхода сжатого воздуха; 11-пара трения; 12-корпус

В обеих схемах отработанная суспензия собирается в специальную емкость, расположенную под станиной машины трения. Окончательный вариант схемы установки, реализованной на кафедре «Триботехнология» УНТИ БГТУ, представляет собой 2-ю рассмотренную схему с рядом конструктивных изменений (рис. 3).

Так, предполагается создание только одной выводной трубки. Электромагнит имеет отличную от ранее применяемой форму (поз.7, рис. 3). Сердечник электромагнита расположен соосно с клапаном и выводной трубкой. Вместо полупроницаемой перегородки используется трубка с отверстиями по поверхности (поз.10, рис. 3).

Необходимым элементом системы является стандартный промышленный компрессор. Взвесь доставляется в зону трения посредством перемешивания абразивно-масляной суспензии, которое осуществляется при непрерывном поступлении в емкость с суспензией воздуха от компрессора. Величина оптимального избыточного выходного давления, необходимого для перемешивания, составляет 0,2-0,3 ат.

Выбор бака конической формы обусловлен необходимостью обеспечения циркуляции абразива по кругу (от точки, где частицы поднимает восходящий поток воздуха, и обратно в эту точку за счет стекания по конической поверхности). В корпус впаивается выводная трубка, по которой под собственным весом суспензия будет

поступать в смазываемую пару трения. Вытекание суспензии возможно только при открытом клапане, положения которого регулируются электромагнитом, благодаря чему также можно добиться дозированной подачи суспензии.

В систему входят соединительные маслостойкие шланги, по которым вытекает суспензия и поступает воздух. Капельное поступление смеси в зону трения достигается путем установки дозирующего устройства над парой трения. Бурления добиваются посредством удлинения шланга, идущего от компрессора, специальной трубкой, по поверхности которой в равномерном порядке расположены мелкие отверстия для выхода сжатого воздуха.

Положение электромагнита выбирается исходя из условия расположения его сердечника строго над выпускной трубкой. Сердечник электромагнита соединяется с клапаном. При подаче импульса тока происходит втягивание сердечника, а следовательно, и клапана. Суспензия устремляется по выводной трубке к паре трения. Усилие прижатия, создаваемое пружиной, должно быть достаточно для прекращения вытекания суспензии. На клапане располагается резиновая коническая насадка. Верхняя часть выводной трубки также имеет коническую форму, для обеспечения плотного соприкосновения с насадкой. С целью фиксации на крышке бака электромагнит помещается в специальную металлическую втулку (корпус), в которой поджимается упорной втулкой для компенсации расстояния, необходимого для рабочего хода сердечника. На конце выводной трубки необходимо предусмотреть размещение крана, позволяющего при отсутствии необходимости применения системы или разборки узла надежно предотвратить вытекание суспензии из бака.

Основные изменения в конструкции системы коснулись порционного дозирующего устройства. Главную роль в нем играет электромагнит, выполняющий функцию управляемого клапана и работающий в двух режимах:

- положение 1: клапан закрыт при отсутствии подачи напряжения на контакты электромагнита за счет действия усилий от пружины сжатия, включенной в систему;
- положение 2: клапан открыт, напряжение подается, возникающие в электромагните магнитные поля действуют на сердечник, сжимая пружину и втягивая его.

Этот узел содержит множество элементов, необходимых для его работы, к которым предъявляются жесткие требования соответствия конструктивной схеме. Кроме того, возникает сложность выполнения требуемого условия четкой соосности клапана и насадки. Особое внимание необходимо уделить и обеспечению плотного прижатия клапана к насадке во избежание самопроизвольного вытекания суспензии из емкости. Реализация дозирующего устройства на основе электромагнита также требует создания электрической схемы с включением в нее понижающего трансформатора.

С функцией обеспечения определенной по необходимому режиму смазывания дозированной подачи суспензии в пару трения вполне может справиться кран, закрепленный на выходной трубке бака (в дополнение к своей основной функции закрытия выходной трубки после испытания и недопущения вытекания оставшейся в баке суспензии). Более рационально возложить функцию дозировки на другое устройство, а именно дозирующее устройство от медицинской капельницы. Оно представляет собой корпус с роликом, скользящий по наклонной плоскости, вследствие чего сжимается гибкая трубка под роликом, идущая от крана бака, и, соответственно уменьшается подача. Другой конец гибкой трубки непосредственно фиксируется в державке изнашиваемого образца (рис. 4,5).

Наиболее приемлемым для технической реализации является размещение системы над парой трения на прочном металлическом кожухе, который одновременно защищает подвижные части машины и оберегает человека от случайного прикосновения к ним (рис. 6). Этот вариант также обеспечивает более благоприятный режим вытекания смеси под давлением, создаваемым собственным весом. Для большей герметичности крышка бака изготовлена с резиновым уплотнением по контуру. В крышке предусмотрено заливное отверстие.

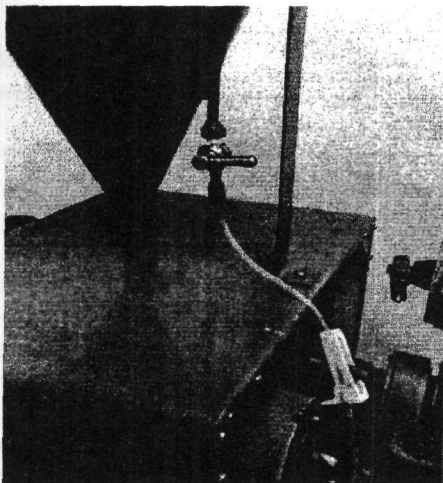


Рисунок 4 - Дозирующее устройство

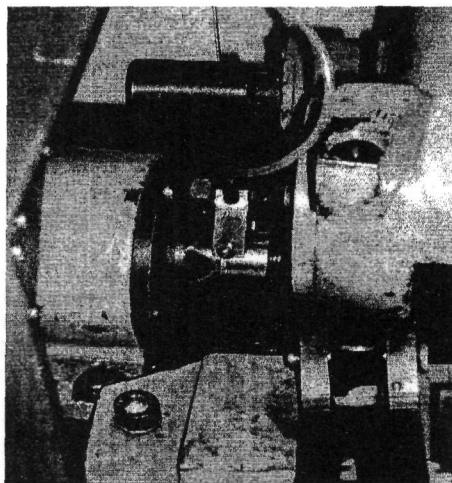


Рисунок 5 - Узел трения

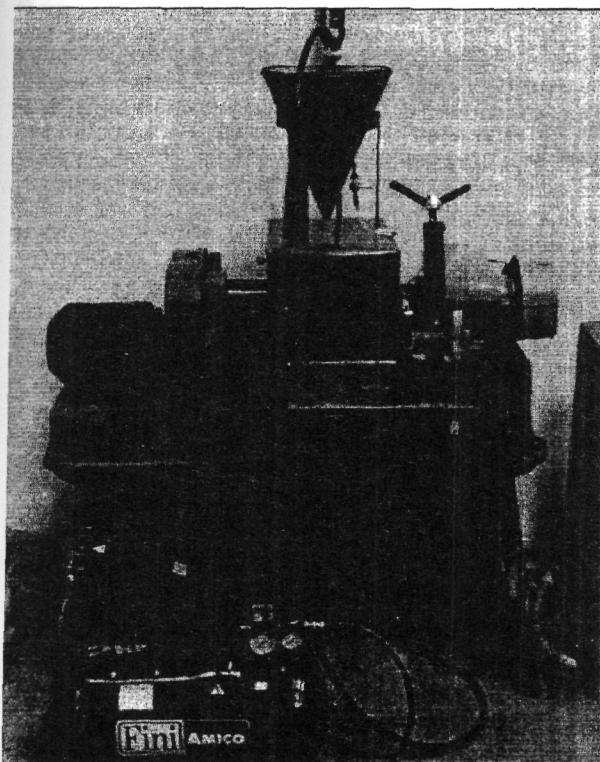


Рисунок 6 - Система перемешивания и подачи абразивно-масляной взвеси на машине трения МИ-1М

Были рассчитаны режимы смазывания, найдено необходимое давление воздуха от компрессора, проведена тарировка нагружающего устройства. Для контроля уровня смеси в процессе испытания и ее минимально допустимого объема изготовлено указательное устройство, представляющее собой поплавков, находящийся в баке, стержень и направляющую с пазом. Указатель на конце стержня перемещается, отображая текущий уровень суспензии в баке. При достижении критической отметки требуется восполнить недостаток суспензии.

С использованием разработанной установки машина трения МИ-1М расширяет свои возможности и позволяет проводить широкую гамму испытаний:

- с образцами из различных материалов с разными значениями параметров качества поверхностного слоя;
- с варьированием режимов нагружения пары трения и регистрацией величин момента трения, усилия прижатия образцов, частоты вращения ролика;
- с различной концентрацией абразивного материала разной зернистости.

Установка для реализации процесса перемешивания абразива до равномерного взвешенного состояния в индустриальном масле легко открепляется и может быть смонтирована на других машинах трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ГОСТ 23.224-86. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей.
- 2 РД 50-339-82. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний на изнашивание абразивно-масляной прослойкой.

Матлахов Виталий Павлович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Триботехнология»
241035, Брянск, бульвар 50-летия Октября, д.7, БГТУ, УНТИ, каф. «ТРГ»
(4832) 58-82-79
trt@tu-bryansk.ru, Jed80@mail.ru

УДК 629.113

В.Н. НИКИШИН, В.В. ВОЛОШКО, Р.А. ФОКИН

ПРОБЛЕМА БЕССТУПЕНЧАТОГО ТРАНСФОРМАТОРА ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА МЕХАНИЧЕСКОГО ТИПА

Обосновывается необходимость разработки бесступенчатого трансформатора вращающего момента механического типа, приводится структурный анализ силового потока идеального трансформатора вращающего момента, обосновывается необходимость исследований замкнутых дифференциальных передач в качестве составляющих трансформаторов вращающего момента.

Ключевые слова: трансформатор вращающего момента, передача, дифференциал, силовой поток

Necessity of development of continuous torque converter is substantiated, structural analysis of power flow of ideal torque converter is given, necessity of research of closed-loop drives as part of torque converter is substantiated.

Key words: torque converter, transmission, differential, power flow

Основным элементом трансмиссии, влияющим на эффективность использования мощности, является трансформатор вращающего момента (ТВМ). Под ТВМ понимается устройство, преобразующее вращающий момент двигателя в соответствии с условиями движения. Понятие ТВМ обобщает ступенчатые механические коробки передач, фрикционные вариаторы, гидромеханические коробки передач, гидростатические трансмиссии и т.п.

Эффективность ТВМ определяется непосредственно потерями мощности в процессе преобразования и передачи момента движителю, диапазоном трансформации момента и способностью постоянно и быстро приспосабливаться к меняющейся внешней нагрузке – адаптивностью.

Наименьшими потерями мощности при передаче, т.е. наибольшим КПД обладают механические ступенчатые зубчатые коробки передач. Они же обладают достаточно широким диапазоном трансформации и хорошими массогабаритными показателями. Самый главный недостаток ступенчатых коробок передач - это невозможность обеспечить постоянное изменение передаточного числа в соответствии с сопротивлением движению.

Проблема создания бесступенчатого механического ТВМ - одна из тех, которые имеют первостепенное общетехническое значение. Такой ТВМ требуется везде: в станкостроении, в приборостроении, в автотракторостроении и других областях техники.

Коэффициент трансформации, который характеризует бесступенчатое изменение передаточного отношения, при этом должен изменяться автоматически, чтобы в любой момент соответствовать сопротивлению движения машины. При этом силовой поток такого механизма должен быть потоком нормальных механических сил.

Существуют бесступенчатые механические фрикционные и импульсные ТВМ. Фрикционный ТВМ можно было бы считать идеальным ТВМ, т.е. решением проблемы бесступенчатого трансформатора, если бы передача силового потока в нем происходила не за счет касательных сил трения, а за счет нормальных сил, как это имеет место, например, в зубчатых передачах. Нормальные силы на порядок превосходят силы трения, что позволило бы значительно уменьшить размеры трансформатора при одновременном увеличении передаваемой мощности, а также повысить его износостойкость. Применение фрикционных ТВМ ограничивается автомобилями малой мощности. Импульсные ТВМ не получили широкого распространения из-за необходимости применения в них в качестве выпрямителей силового потока муфт свободного хода, отличающихся крайней ненадежностью.

Поэтому проблема бесступенчатого механического ТВМ до сих пор остается нерешенной [1]. Более того, возникает вопрос, можно ли вообще создать такой трансформатор? Эта проблема требует предварительного теоретического исследования.

Наиболее распространенный в автомобилях зубчатый механизм является импульсным ТВМ. В нем силовой поток передается импульсами нормальных сил. При этом имеет место выпрямление импульсов, которое совершается входящими в зацепление и выходящими из зацепления зубьями.

Таким образом, проблема бесступенчатого ТВМ сводится к созданию такого механизма, передача силового потока в котором происходит импульсами нормальных сил, при этом импульсный трансформатор должен иметь выпрямитель [2].

Наиболее удобно было бы использовать в качестве импульсного трансформатора дифференциальную зубчатую передачу. В свое время неоднократно делались попытки создать ТВМ, используя планетарные механизмы в различных комбинациях. Чтобы выяснить, является ли данное преобразующее устройство трансформатором, его, в первую очередь, следует идеализировать. Если в этом случае происходит изменение вращающего момента и угловой скорости отводимого потока при неизменном моменте и угловой скорости подводимого потока, то это – трансформатор.

Идеализация силового потока ТВМ является не простым упрощением силового потока. Здесь заложены более глубокие соображения. Дело в том, что идеальный ТВМ это трансформатор с внутренним чисто реактивным потоком. В реальном ТВМ реактивный поток сопровождается активным диссипативным потоком. Тогда при наличии внутреннего реактивного потока возможно существование ТВМ [2].

Представим себе планетарный механизм с двумя степенями свободы. Пусть одну степень свободы гасит тормоз. Изменением нагрузки на тормоз можно менять момент и скорость (допуская пробуксовку тормоза) потока, проходящего через механизм. Будет ли этот механизм трансформатором? Очевидно, нет, так как с исчезновением пробуксовки в тормозе (идеализация механизма) момент и скорость меняться не будут. Таким образом, уже одна только идеализация механизма позволяет определить, принадлежит ли данный механизм к типу трансформаторов или нет.

Отсюда также следует, что за счет трения в механизме (или других видов потерь) нельзя создать трансформатор. Так, нельзя построить трансформатор с помощью фрикционных или каких-нибудь других (гидравлических, электромагнитных) муфт и их комбинации с планетарными механизмами. Заманчиво, например, было бы построить гидродинамический трансформатор из сочетания зубчатого редуктора с гидромуфтами в любой комбинации. Однако ни одна из этих комбинаций не дает ТВМ. Действительно, как только будут заблокиро-

ваны муфты, силовой поток перестанет регулироваться и передача превратится в обычный редуктор.

В общем случае, с учетом теории силового потока механических передач, ТВМ может представлять собой передачу с несколькими входными и выходными валами. Здесь мы, однако, будем рассматривать только трансформаторы с одним входным и одним выходным валами; принцип работы трансформатора от этого не меняется.

Силовой поток такого трансформатора будет состоять из трех узловых точек (УТ) — одной разветвляющей с заторможенным реактивным потоком и двух кинетических (рис. 1). Кинетические точки связаны между собой относительным потоком преобразования (линия с зубчиком). Этот поток может быть механическим, гидравлическим или электрическим.

Вращательный механический поток (I, II, p) является основным потоком трансформатора.

Обе или, по крайней мере, одна из кинетических точек должна быть регулируемой. Регулируемую точку обозначим знаком ~. Регулятором может быть произвольно изменяющаяся величина момента сопротивления на выходном звене ТВМ.

Кинетическую узловую точку Г, к которой подводится поток I, назовем генераторной, а точку II — двигательной или моторной — Д.

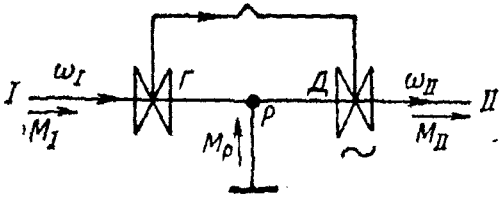


Рисунок 1 — силовой поток идеального трансформатора вращающего момента

Из схемы силового потока (СП) следует, что в точке Г вращательный механический поток преобразуется в поток какой-либо другой формы энергии, а в точке Д снова переходит во вращательный механический поток, но с другими параметрами — угловой скоростью и моментом.

Разветвляющая точка p является реактивной УТ, в ней происходит изменение силового фактора (момента) генераторной точки. Так у ТВМ прямого хода реактивный момент $M_p > 0$, тогда

$$M_{II} = M_I + M_p,$$

где M_{II} — вращающий момент, отводимый от двигательной кинетической узловой точки Д;

M_I — вращающий момент, подводимый к генераторной кинетической узловой точке Г;

M_p — реактивный вращающий момент разветвляющей точки p.

Момент на выходном валу увеличивается по сравнению с моментом на входном валу. Если $M_I = \text{const}$, то регулирование момента M_{II} происходит за счет изменения реактивного момента M_p .

Исходя из вышеизложенного, перспективными являются исследования в качестве ТВМ комбинаций обычных и замкнутых дифференциальных передач с циркуляцией мощности.

Инженеры-механики столкнулись с явлением циркуляции сравнительно недавно, при изучении работы планетарных механизмов. Условием возникновения циркуляции является наличие в передаче замкнутого контура, в котором возникают замкнутые силовые потоки. В замкнутом циркулирующем силовом потоке имеет место следующий баланс мощностей [2]:

$$N_1 = N_1 + N_2,$$

где N_1 — активная мощность потока;

N_2 — реактивная мощность потока;

N_1 — полная мощность потока.

Отсюда $N_1 > N_1$, т.е. внутренний поток больше подводимого внешнего потока. В технической литературе циркуляцию обычно называют циркуляцией мощности. Это, конечно,

верно, так как под мощностью понимается активный поток, а циркулировать может лишь реактивный поток (реактивная мощность).

Инженерам-электрикам явление циркуляции мощности было давно известно, и оно широко использовалось ими, например, при рекуперации электрической энергии в электро-тяговых машинах.

Рассматривая электрические переменные токи, мы встречались с понятием реактивная и активная мощности. Между электрическими и механическими потоками можно установить аналогию. Здесь мощность N_1 – активная, N_2 – реактивная, N_1 – полная.

Закон замкнутого силового потока определяет выводы, согласно которым за счет циркуляции диапазон регулирования передачи расширяется и становится больше диапазона трансформатора, образующего замкнутый силовой поток.

Такие исследования замкнутых дифференциальных передач с целью их совместной работы с обычными дифференциальными механизмами и на этой базе – создание автоматического трансформатора вращающего момента с бесступенчатым изменением передаточного отношения производятся в лаборатории «Дифференциальные и гидромеханические вариаторы» ИНЭКА. Результаты исследования различных вариантов кинематических схем имеют положительный эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Антонов А.С. Комплексные силовые передачи: Теория силового потока и расчет передающих систем. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981. – 496 с.
- 2 Антонов А.С. Силовые передачи колесных и гусеничных машин. Теория и Расчет. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1975. – 480 с.

Никишин Вячеслав Николаевич

Камская государственная инженерно-экономическая академия, г. Набережные Челны
Доктор технических наук, профессор, зав. циклом «Автомобиле- и тракторостроение» кафедры «ДВС»
тел. (8552) 58-91-52
E-mail: nikishin@kampi.ru

Волошко Владимир Владимирович

Камская государственная инженерно-экономическая академия, г. Набережные Челны
заведующий лабораторией «Дифференциальные и гидромеханические вариаторы» кафедры «ДВС»
тел. 8-919-629-71-19

Фокин Руслан Анатольевич

Камская государственная инженерно-экономическая академия, г. Набережные Челны
аспирант кафедры «ДВС»
тел. 8-919-681-52-62
E-mail: fokin.ruslan@gmail.com

УДК 621.9

В.В. ПЛЕШАКОВ, Д.А.АЛБАГАЧИЕВ

УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Разработаны алгоритм расчета остаточных напряжений и рекомендации по программному поверхностному пластическому деформированию (ПППД). Проведено экспериментальное исследование влияния технологических факторов процесса обработки дробью на

параметры качества поверхностного слоя и усталостную прочность деталей из стали 30ХГСН2А

Ключевые слова: детали машин, упрочнение, поверхностное пластическое деформирование

Developed algorithm for calculating the residual stresses and recommendations on software to surface plastic deformation (PPPD). An experimental study of the effect of technological factors, the processing of lead shot on the quality of the surface layer and the fatigue strength of parts made of steel 30HGSN2.

Key words: details of machines, hardening, superficial plastic deformation

Силовые элементы летательных аппаратов, оборонной техники изготавливают из высокопрочных сталей типа 30ХГСН2А, ВНС, ВКС, титановых сплавов. Наиболее эффективным и распространенным в авиационной технике методом повышения усталостной прочности деталей является применение методов поверхностного пластического деформирования (ППД). Для обработки поверхностей деталей как сложной так и простой формы применяются ударные методы ППД: обработка деталей дробью, шариками и другими рабочими телами.

Возможности традиционных способов ППД практически полностью реализованы. Дальнейшее повышение их эффективности затрудняется однозначным изменением свойств поверхностного слоя при варьировании режима обработки. “Ужесточение” режимов (большая скорость дроби, продолжительность обработки) не приводит к большей степени упрочнения поверхностного слоя из-за явлений термопластической деформации. Поэтому, создание оптимальной эпюры распределения механических свойств в поверхностном слое является резервом повышения усталостной прочности деталей. Об этом свидетельствуют результаты исследования по комбинированной обработке поверхностей ППД: алмазное выглаживание с последующей обработкой поверхности упрочняющими щетками (Д.Д.Палшев), химико-термическая обработка и ППД (В.И.Серебряков) и др. Используя тот же принцип многократного и изменяющегося силового воздействия рабочего тела на поверхность, предложен способ программного поверхностного пластического деформирования (ПППД). Сущность метода заключается в программном изменении режимов в процессе ППД поверхности. Изменением программы нагружения поверхности можно добиться любого распределения свойств материала в поверхностном слое и повысить эксплуатационные свойства деталей из высокопрочных сталей.

Для оценки эффективности ударных ПППД проводилось исследование остаточных напряжений в поверхностном слое формируемых в процессе обработки. Процесс ПППД деталей дробью осуществлялся поэтапно. Каждый этап характеризуется определенным уровнем силового воздействия рабочих тел на поверхность детали.

Зависимость остаточных напряжений от продолжительности дробеструйной обработки носит модифицированный экспоненциальный характер. Поэтому введены следующие предпосылка моделирования процесса ПППД: продолжительность обработки на каждом этапе (3 мин.) обеспечивает достаточно стабильное и однозначное распределение остаточных напряжений в поверхностном слое, которое определяется исключительно условиями обработки.

Эпюра распределения остаточных напряжений определяется целым рядом процессов, протекающих при ППД (процессы упруго-пластической деформации, тепловые процессы в зоне контакта рабочих тел с поверхностью детали, волновые процессы). Анализ указанных процессов позволил определить две основные составляющие, формирующие интенсивность остаточных напряжения на расстоянии h от поверхности детали:

$$\sigma(h) = \sigma_m(h) + \sigma_0(h), \text{ Па} \quad (1)$$

где σ_m – остаточные напряжения в поверхностном слое, возникающие из-за термопластического эффекта, Па;

σ_0 – остаточные напряжения в поверхностном слое, возникающие из-за упруго-пластической деформации поверхностного слоя, Па.

Решение частной задачи Буссинека позволяет оценить распределение напряжений- σ_0 в упругой среде при точечном приложении силы Р и оценить толщину пластически деформированного слоя Н:

$$H = (1,5 \cdot P \cdot \pi \cdot \sigma_0)^{0,5}, \text{ м} \quad (2)$$

Оценка степени деформации упруго-пластического тела под воздействием рассчитанных напряжений задача сложная и не разрешимая классическими методами теории пластичности и упругости. Поэтому, в первом приближении принята степенная аппроксимация эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое:

$$\sigma_0 = -\sigma_0(1 - h/H)^n, \text{ Па} \quad (3)$$

где n – постоянная, характеризующая нелинейность эпюры распределения остаточных напряжений (0,80...0,85).

На следующем этапе ПППД пластическая деформация поверхностного слоя оценивается следующим образом. Если формируемые на предыдущем этапе остаточные напряжения и степень деформации материала меньше, чем создаваемые на последующем этапе, принимаем значения параметров деформации и напряжений, создаваемые на последнем этапе. В противном случае остаточные напряжения и степень деформации в рассматриваемой точке поверхностного слоя не меняются. Оценка изменения твердости и предела текучести материала в зависимости от степени его деформации производилась на основании разработанных регрессионных моделей. Оценка термопластической составляющей остаточных напряжений в каждой точке деформируемой поверхности получена на основе оценки интенсивности термического воздействия в этой точке. Для этого рассмотрено классическое дифференциальное уравнение теплопроводности, решение которого позволило оценить распределение интенсивности остаточных напряжений в поверхностном слое следующим образом:

$$\sigma_i = \frac{E \cdot \alpha_m \cdot \beta \cdot V^2 (1 - K_s^3)}{4\omega^{15} (8\pi \cdot (1 + K \cdot K_s))} \cdot \exp\left(\frac{-h^2 V}{4h(1 + K \cdot K_s)}\right), \text{ Па} \quad (4)$$

где E – модуль упругости, Па;

α_m – коэффициент линейного расширения;

β – коэффициент распределения тепловых потоков;

V – скорость рабочего тела перед ударом, м/с;

K_s – коэффициент восстановления скорости;

K – коэффициент восстановления поверхности;

ω – коэффициент температуропроводности.

Разработан алгоритм расчета распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей для любой программы пластического нагружения поверхности. Статистическим анализом доказана адекватность разработанной модели экспериментальным данным при 95% уровне доверительной вероятности во всем диапазоне изменения факторов процесса ПППД. Ошибка оценки остаточных напряжений в поверхностном слое на расстоянии 80-100 мкм от поверхности составляет не более 20%. Выявлены основные закономерности изменения остаточных напряжений в зависимости от режимов ПППД.

Проведено экспериментальное исследование влияние технологических факторов процесса ПППД обработкой дробью на параметры качества поверхностного слоя и усталостную прочность деталей из стали 30ХГСН2А.

Для разработки достаточно универсальных технологических рекомендаций по ПППД не зависящих от конструкции установки для дробеструйной обработки необходимо выявить закономерности формирования потока рабочих тел. В качестве новой системы технологических факторов рассмотрены: интенсивность потока – \square , закон распределения скорости шариков – $p(V)$, диаметр шариков – D.

В результате обработки экспериментальных данных для пневмодинамического устройства пистолетного типа разработаны следующие модели:

$$M(V) = 3,822 - 1,326D + 11,19P - 5,823P^2 + 0,0772D, \text{ м/с}; \quad (5)$$

$$Lg \square = 1,489 + 0,00103PN + 0,00196N - 10^{-6}N^2 + 0,995P;$$

где M — масса загружаемых в устройство шариков;
 N — число загружаемых в устройство шариков;
 $N = 1480,5 - 390D + 10D^2$.

Обработка деталей в дробеметном устройстве характеризуется следующими моделям:

$$V = 5 \text{ м/с};$$

$$\lambda = 78,1 - 29,3D + 283,3M - 42,71DM - 300,4M^2 + 3,87M, \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

При программном ППД шероховатость поверхности деталей из стали 30ХГСН2А определяется технологическими факторами последнего этапа обработки, в том числе степенью упрочнения поверхности. При дробеметном упрочнении зависимость шероховатости от технологических факторов представлена в следующем виде:

$$R_a = 0,0235D + 1,5673M^2 - 3,053 \varepsilon^2 + 0,07948D^2 + 0,397 - 0,9288M - 0,1165 D_\varepsilon + 0,3271 \varepsilon, \text{ мкм}. \quad (6)$$

При пневмодинамической обработке:

$$R_a = -0,01415PD + 0,042 + 0,021 \varepsilon + 0,0198D^2 + 1,337P - 0,019 D_\varepsilon - 0,15 P_\varepsilon + 0,0033 \varepsilon^2, \text{ мкм}.$$

Переход к системе факторов, не зависящих от конструкции устройства, позволил предложить следующую модель процесса:

$$R_a = 0,0122VD + 0,0877 \varepsilon + 0,045D^2 + 0,0147V^2 - 0,099D + 0,029 D_\varepsilon - 0,0144 V_\varepsilon - 0,047, \text{ мкм}$$

Наибольшее влияние на высоту шероховатости оказывает скорость и диаметр шариков. Увеличение степени упрочнения от 0 до 0.2 шероховатость поверхности несколько снижается, однако снижение это не значительно.

Для оценки распределения микротвердости в поверхностном слое деталей изготавливались шлифы под углом $1,5...2^\circ$. Остаточные напряжения измерялись методом непрерывного травления. Влияние режимов ПППД на распределение механических свойств поверхностного слоя, представлено следующими моделями:

$$H_i = 4,34 + 2,14V - 1,111VD + 0,234D^2 - 3,23V^2 - 3,78h - 1,788H_i - 1, \text{ ГПа} \quad (9)$$

$$\sigma_i = 1,223 + 3,333 \sigma_{ih} - 35,43VD - 23,47V^2 - 0,754 \sigma_i^2, \text{ ГПа} \quad (10)$$

Модели позволили выявить основные закономерности процесса упрочнения поверхностного слоя. Показано, что при ПППД поверхностей деталей шариками большого диаметра с большой скоростью формируется упрочненный слой большой толщины (до 250 мкм). А для создания высоких остаточных напряжений в тонком подповерхностном слое толщиной до 50 мкм, необходимо использовать шарики малого диаметра. Причем зависимость напряжений от диаметра носит монотонный характер. Для эффективного упрочнения следует применять шарики диаметром даже меньшим 2 мм.

Если в программе изменения режимов предусмотреть изменение лишь скорости шариков, операцию упрочнения деталей можно проводить за один переход. Наилучший эффект достигается при диаметре шариков 3 мм и дискретном или непрерывном изменении их скорости от 8...10 до 2...3 м/с. В этом случае в поверхностном слое до 100 мкм формируются остаточные сжимающие напряжения до 1,5...1,6 ГПа.

Для оценки влияния эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое на много- и малоцикловую выносливость стали 30ХГСН2А проводились испытания образцов при изгибе с вращением ($\sigma_a = 1,0$ ГПа) и при пульсирующем растяжении ($\sigma_a = 1,4$ ГПа). Получены следующие модели зависимости числа циклов нагружения до разрушения образцов от характерных точек эпюры остаточных напряжений:

многоцикловая выносливость

$$N = 10^6 (1,49 + 1,655 \sigma_n \sigma_{\max} - 2,096 \sigma_n + 0,245 \sigma_n^2 - 0,173 \sigma_{\max}), \text{ циклов};$$

малоцикловая выносливость

$$N = 10^3 (23,76 + 23,67 \sigma_n^2 - 40,07 \sigma_n + 7,50 \sigma_{\max} \sigma_n - 3,78 \sigma_{\max}), \text{ циклов}.$$

Полученные данные свидетельствуют о преимущественном влиянии на усталостную прочность подповерхностного слоя. Причем, большей чувствительностью к изменению σ_n

h обладает малоцикловая выносливость деталей. В целом зависимость является монотонной, что позволило использовать в качестве целевой функции в оптимизационной модели процесса ПППД использовать остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое. Использование оптимальных режимов ПППД позволило повысить предел малоцикловой выносливости на 3...5% по сравнению с упрочненными традиционным методом образцами.

Разработанные технологические рекомендации по оптимальному упрочнению деталей программным поверхностным пластическим деформированием внедрены при изготовлении деталей типа валов и осей машин на ПО "Муромтепловоз" с условным экономическим эффектом в размере двадцать миллионов рублей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Плешаков В.В., Никифорова Т.В. Программное поверхностное пластическое деформирование деталей из высокопрочных сталей. –М.: ИнТС, 1994, -112с.
- 2 Плешаков В.В., Никифорова Т.В. Программное нагружение поверхностей деталей из высокопрочных сталей при дробеструйной обработке. В кн.– Разработка и внедрение новых ресурсосберегающих технологий в области машиностроения. -Орел: ОФ МИП, 1991, с. 99–103.
- 3 Плешаков В.В., Никифорова Т.В. Оценка остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после ПППД. В кн.– Комплексная механизация и автоматизация производства, -Пенза: ПДЭНТЗ, 1991.
- 4 Плешаков В.В., Шатерников В.Е., Никифорова Т.В. Магнитошумовой контроль технологических напряжений. –М.: ИнТС, 1995, -155с.

Плешаков Виктор Викторович

Московский государственный университет приборостроения и информатики
Профессор

Албагачиев Джемалд Алиевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики
Аспирант
E-mail: Albagachiev@yandex.ru

УДК 621.001.4

М.И. ПРУДНИКОВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Рассмотрены вопросы нормализации и автоматизации триботехнических испытаний для одноступенчатого решения задачи технологического обеспечения износостойкости. Предложен и обоснован метод испытаний цилиндрических поверхностей трения, а также его реализация в виде автоматизированной системы научных исследований.

Ключевые слова: автоматизация, база данных, технологическое обеспечение, триботехнические испытания.

The problems of standardization and automation of tribological tests for a single-stage solution of the task of technological ensuring of a wear resistance are considered. The test method of cylindrical sliding surfaces is offered and justified, and also its realization as an automated system of scientific researches.

Key words: automation, data base, technological ensuring, tribological tests.

На сегодняшний день трибометрия является основным источником получения данных по триботехническим показателям. В условиях постоянно увеличивающегося количества триботехнических материалов и технологических методов обработки поверхностей трения возникает необходимость систематизации данных, полученных средствами трибометрии, организации автоматизированных баз данных, информационно-поисковых и экспертных систем. При создании баз данных всегда встает вопрос о сопоставимости результатов различных экспериментальных исследований. В трибологии отсутствуют инвариантные, т.е. не зависящие от методов и режимов их определения показатели. В связи с этим необходима разработка единых научно обоснованных и совершенных с технической точки зрения методов триботехнических испытаний.

Большинство существующих стандартных методов предназначено для оценки износостойкости материалов в условиях различных видов абразивного изнашивания, однако ряды износостойкости материалов при различных видах изнашивания не имеют однозначной корреляции.

Фактически существующие стандартизованные методы лабораторных испытаний предназначены для оценки триботехнических свойств материалов. Поэтому в методике, как правило, заранее оговаривается способ подготовки испытуемой поверхности образца. Однако машины одинаковых конструктивных схем, с деталями из одних и тех же материалов часто имеют различную надежность. В настоящий момент актуально рассмотрение триботехнических свойств поверхности трения, получившей определенное технологическое воздействие. Для предварительных оценок возможности использования материала или метода обработки поверхности детали в узле трения важно иметь набор информативных характеристик поведения поверхности трения в некоторых заранее оговоренных и научно обоснованных стандартизованных условиях трения и смазки.

Реализация перспективного одноступенчатого решения задачи технологического обеспечения износостойкости сдерживается из-за отсутствия базы данных по зависимости триботехнических показателей от условий обработки трибоэлементов [3].

Установлено, что из-за отсутствия единого метода испытаний поверхностей трения применительно к условиям трения скольжения при граничной смазке и усталостном изнашивании результаты различных экспериментальных исследований оказались несопоставимы: поверхности, обработанные при одних и тех же технологических условиях, по данным различных исследований, имеют износостойкость, отличающуюся в десятки раз [4]. Поэтому в Учебно-научном технологическом институте Брянского государственного технического университета был разработан нормализованный метод триботехнических испытаний поверхностей [1].

Сущность метода заключается в том, что при испытаниях с постоянной нагрузкой и скоростью скольжения к вращающейся испытуемой цилиндрической (наружной или внутренней) или плоской поверхности образца (рисунок 1), погруженной в смазочный материал, прижимают неподвижный самоустанавливающийся индентор; непрерывно и синхронно регистрируют время испытания, коэффициент трения, линейный износ, температуру у поверхности трения; повторяют испытания на новых участках трибоконтакта (или на идентичных образцах) при заданном времени и по их результатам определяют показатели триботехнических свойств (таблица 1). Идентификация режима приработки производится по комплексной стабилизации скорости изнашивания, коэффициента трения и температуры.

Нормализованный метод разработан на основе концепции определения показателей триботехнических свойств в условиях определенных, жестко регламентированных режимов трения и смазки. Именно этим обусловлен выбор схемы трения с сосредоточенным (герцевским) контактом. Такая схема имеет следующие преимущества для рассматриваемой области:

- минимизация погрешностей, связанных с установкой образца и контртела;
- возможность использования в качестве контртел идентичных сменных трущихся элементов, применяемых для производства стандартных изделий;

- исключение режима приработки на макроуровне, сокращение длительности приработки и в целом испытаний;
- возможность использования малогабаритных, относительно простых, но высокоточных систем нагружения средств испытаний;
- обеспечение минимального коэффициента взаимного перекрытия, что позволяет в значительной степени исключить влияние фрикционного разогрева, в том числе на измерительные датчики триботехнического оборудования, и избежать появления катастрофических видов изнашивания;
- вследствие высоких давлений и формы контактирующих поверхностей возникают наилучшие условия для обеспечения граничной смазки и наихудшие – для образования гидродинамического масляного клина.

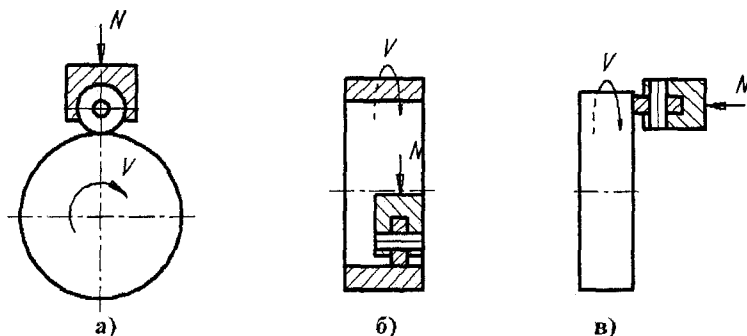


Рисунок 1 – Схемы трения при испытаниях поверхностей

а – наружных цилиндрических, б – внутренних цилиндрических, в – торцовых (плоских)

Таблица 1 – Показатели триботехнических свойств, определяемые по результатам испытаний

Триботехническое свойство	Показатель
Прирабатываемость	Прирабочный износ h_0 , мкм
	Отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки f_0 к его среднему значению в период нормального изнашивания f
	Отношение максимального значения температуры трибосопрежения в период приработки T_0 к его среднему значению в период нормального изнашивания T
	Время приработки t_0 , с
Антифрикционность	Среднее значение коэффициента трения в период нормального изнашивания f
Износостойкость	Среднее значение скорости изнашивания в период нормального изнашивания γ , мкм/ч

В качестве контртела применена твердосплавная пластина 12133-150400 ВК8 ГОСТ 19070, рассматриваемая как абсолютно жесткий, гладкий и неизнашиваемый индентор. В процессе испытаний индентор скользит по поверхности образца в режиме многократных проходов по ранее образованному им следу. Номинальная геометрия контакта остается постоянной в течение всего испытания, и показатели триботехнических свойств поверхности определяются по отношению к практически неизменному, фиксированному качеству поверхностного слоя индентора. Предложенная схема обеспечивает максимальное постоянство номинального контактного давления, коэффициента взаимного перекрытия и меры конформности сопряженных тел, что доказано сравнительным теоретическим анализом всех геометрически возможных схем трения.

Нагрузочно-скоростные параметры испытания предлагается назначать из условия недопустимости достижения предельной теоретической величины относительного контактного сближения ($\varepsilon=0,35$) и обеспечения условий граничной смазки. Контактное сближение в предположении преобладания его пластической составляющей определяется на основе формулы [3]

$$y_{nl} = \left(\frac{NRp^v Wp^{v_w}}{A_a tm tm_w Ck \sigma_m} \right)^{\frac{1}{v+v_w}}, \quad (1)$$

где N – приложенная нагрузка;

Rp, Wp – высота сглаживания соответственно профиля шероховатости и волнистости;

v, v_w – параметры степенной аппроксимации начального участка опорной кривой соответственно профиля шероховатости и волнистости;

A_a – номинальная площадь контакта;

tm, tm_w – относительная опорная длина соответственно профиля шероховатости и волнистости на уровне средней линии;

C – коэффициент стеснения;

k – коэффициент упрочнения поверхностного слоя;

σ_m – предел текучести материала.

Условия обеспечения граничной смазки определяются неравенством, полученным на основе уравнения А.Г. Суслова [3] для рассматриваемого случая контакта:

$$\frac{Rp - \left(\frac{1,7 P_a}{\sigma_m} \right)^{\frac{1}{v+4}} \Pi}{1,65 R^{0,27} E'^{0,18}} > \left(\frac{\eta \alpha v}{P_a^{0,25}} \right)^{0,73}, \quad (2)$$

где P_a – максимальное давление в контакте по Герцу;

Π – комплексный параметр свойств поверхностного слоя, определяющий несущую способность;

R – приведенный радиус контактирующих индентора и образца;

E' – приведенный модуль упругости;

η, α – динамическая вязкость и пьезокоэффициент вязкости смазочного материала;

v – скорость скольжения.

Дополнительно условия смазки оценивались при помощи известного критерия режима смазки λ и на основе анализа реализуемых при испытаниях коэффициентах трения.

На основе расчетов с учетом приведенных зависимостей (1, 2) с применением разработанного программного обеспечения сформированы таблицы выбора нагрузок на индентор при испытаниях (таблица 2) в зависимости от соотношения параметров качества испытываемой

поверхности $\frac{Ra \sqrt{H\mu_0}}{Wz}$ (Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости;

$H\mu_0$ – микротвердость; Wz – средняя высота волн).

Скорость скольжения ($v=1$ м/с) и смазочный материал (масло И-20А ГОСТ 20799-88) приняты постоянными с учетом анализа условий работы типовых узлов трения и рекомендаций государственных стандартов по проведению сравнительных испытаний. Вероятность схватывания и заедания оценивалась по методике Ю.Н. Дроздова [2] и на основе экспериментов. Продолжительность испытаний определялась условиями завершения приработки и накопления измеримого износа образца. Также были проанализированы факторы, влияющие на погрешность установления требуемого контактного давления (допуски на размеры образцов и индентора, неточность установки и износ индентора, радиальные и торцовые биения образца и др.), и пронормирована величина каждого фактора.

Таблица 2 – Выбор значения испытательной нагрузки

Диапазон от- ношения $\frac{Ra\sqrt{H\mu_0}}{Wz}$, $H^{0,5}/\text{мм}$	Испытательная нагрузка N для		
	наружных цилиндрических поверхностей, Н	внутренних цилиндрических поверхностей, Н	торцовых (плоских) поверхностей, Н
15-20	60	115	80
20-25	180	345	235
25-30	445	860	585

Ведущая роль по ускорению экспериментальных исследований отводится автоматизации испытаний и регистрации их параметров непосредственно в процессе трения. Поэтому описанный нормализованный метод триботехнических испытаний был реализован в виде автоматизированной системы научных исследований (АСНИ). В качестве базовой установки для создания АСНИ применена серийная машина трения МИ-1М типа «Амслер», которая подверглась модернизации.

С применением нормализованного метода и АСНИ были проведены экспериментальные исследования влияния технологических условий обработки на показатели триботехнических свойств наружных цилиндрических поверхностей, обработанных точением и алмазным выглаживанием. Чистовое обтачивание поверхностей образцов производилось после термообработки (до 35 HRC₂). Алмазным выглаживанием обрабатывались нетермообработанные образцы (187 НВ) после предварительного точения. В обоих случаях проводился полнофакторный эксперимент с матрицей 2³. В качестве входных параметров выбраны наиболее характерные для конкретного вида обработки: для точения учитывались скорость резания V , подача на оборот s , глубина резания t ; для алмазного выглаживания – усилие выглаживания P_n , радиус алмазного индентора R_n , подача на оборот s_n (таблица 3).

Таблица 3– Условия проведения экспериментов

Метод обработки	Фактор	Уровень фактора	
		–	+
Точение	V , м/мин	60	100
	s , мм/об	0,05	0,15
	t , мм	0,1	0,4
Алмазное выглаживание	P_n , Н	50	200
	R_n , мм	2	3,5
	s_n , мм/об	0,05	0,15

По результатам экспериментов получены адекватные эмпирические зависимости показателей триботехнических свойств от режимов обработки для точения:

$$h_0 = 28,119V^{-0,411} s^{0,350} t^{-0,153};$$

$$f_0 = 0,496V^{-0,213} s^{0,159} t^{-0,078};$$

$$t_0 = 1,381V^{0,257} s^{0,653} t^{-0,134};$$

$$f = 0,220V^{-0,109} s^{0,090} t^{-0,037};$$

$$\gamma = 1,841V^{-0,348} s^{-0,157};$$

для алмазного выглаживания –

$$h_0 = 17,763P_n^{-0,316} R_u^{-0,170} s_n^{0,193};$$

$$f_0 = 0,363P_n^{-0,165} R_u^{-0,053} s_n^{0,103};$$

$$t_0 = 1,256P_n^{0,084} R_u^{-0,372} s_n^{0,037};$$

$$f = 0,174P_n^{-0,090} s_n^{0,049};$$

$$\gamma = 0,939P_n^{-0,201} R_u^{0,147} s_n^{0,075},$$

которые могут быть использованы для практических инженерных расчетов.

Предлагаемый метод испытаний, научно обоснованный и проверенный практикой, позволит оперативно создать базу данных по технологическому обеспечению триботехнических свойств и пополнять ее достоверными данными, установить возможности различных технологических методов обработки в обеспечении показателей триботехнических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Горленко, А.О. Нормализация триботехнических испытаний для создания базы данных по ноступенчатому технологическому обеспечению износостойкости / А.О. Горленко, М.И. Прудников // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – №9. – С. 7-13.
- 2 Дроздов, Ю.Н. Противозадирная стойкость трущихся тел / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Арчевов, В.И. Смирнов. – М.: Наука, 1981. – 139 с.
- 3 Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
- 4 Суслов, А.Г. К вопросу о нормализации испытаний на трение и изнашивание / А.Г. Суслов, А.О. Горленко, М.И. Прудников // Стандартизация и менеджмент качества: сборник научных трудов / под ред. О.А. Горленко, Ю.П. Симоненкова. – Брянск, 2006. – С. 33-39.

Прудников Максим Иванович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Триботехнология»
Тел. +7 (4832) 588279
E-mail: maystwo@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.874

В.Ю. АНЦЕВ, А.С. ТОЛОКОННИКОВ, П.Ю. КАЛАБИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ МОСТОВЫХ КРАНОВ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ

В статье рассматриваются вопросы оптимизации металлоемкости пролетных балок мостовых кранов с поясными листами разной толщины.

Ключевые слова: оптимизация металлоконструкций, кран мостовой

In article questions of optimisation of metal consumption of main beams of bridge cranes with zone sheets of a different thickness are considered.

Keywords: optimisation of metal design, a bridge crane

Известно, что основным условием оптимального проектирования металлических конструкций грузоподъемных кранов является создание рациональных конструктивных схем и установление областей их применения при наиболее выгодных значениях их геометрических параметров и размеров отдельных элементов. Применительно к металлоконструкциям мостовых кранов на передний план выходит задача снижения, т. к. масса металлоконструкции в значительной степени определяет её стоимость.

Минимальные размеры поперечных сечений рассчитываемой конструкции определяются из условий прочности при одноразовой наибольшей нагрузке и при переменных во времени нагрузках различной величины; при этом должна быть обеспечена местная устойчивость продольно-сжатых и листовых элементов конструкций.

Оптимизации параметров пролетных балок мостовых кранов посвящены работы многих авторов: Серлин Л.Г., Гохберг М.М., Позынич К.П., Будрин С.Б., Беспалов В.Н. и т. д. В общем виде для балки симметричного сечения, при расчете на прочность по расчетным случаям IIa и IIб, удаётся в явном виде выразить зависимость площади сечения от момента сопротивления, представляющую собой целевую функцию [1, 2]

$$F = 1,5 \left(\frac{W_x}{h} + \frac{W_y}{b} \right) = \frac{2W_x}{h} + \frac{4}{3} h_{дс},$$

где W_x , W_y – моменты сопротивления сечения относительно осей x и y , m^3 ; h , b – высота и ширина сечения, m ; $h_{дс}$ – толщина стенки, m .

Таким образом, задача оптимизации сводится к минимизации площади F при заданных моментах сопротивления. Задаваясь значением толщины стенки, вычисляются оптимальные значения высоты и ширины балки, толщины поясов.

Данная методика требует, в процессе проектирования, корректировки значения ширины балки для кранов малой грузоподъемности, которая, исходя из технологических соображений, должна составлять не менее 300-350 мм [3]. Кроме того, для балки с заданным пролетом, толщина поясных листов уменьшается с увеличением грузоподъемности (следовательно, увеличением толщины стенки), что противоречит условию обеспечения прочности верхнего пояса.

Исследование конечно-элементной модели пролетной балки показало, что вследствие местного давления ходового колеса грузовой тележки, верхний пояс в процессе эксплуатации испытывает большие значения напряжений, чем нижний. Таким образом, возникает вопрос об оптимальном проектировании металлоконструкций балок с поясами разной толщины.

Рассмотренная выше аналитическая методика определения оптимальных параметров поперечного сечения в данном случае становится непригодной, т. к. не представляется возможным в явном виде установить зависимость площади от моментов сопротивления, что объясняется смещением центра тяжести поперечного сечения в сторону более толстого пояса.

Задача оптимизации металлоконструкций балок с поясами разной толщины может быть решена методами нелинейного программирования, которые находят широкое применение в современной системе автоматизированного проектирования и расчёта MathCAD. Реализованный в этом программном продукте метод конечных разностей позволяет решать прямые задачи оптимизации с ограничениями.

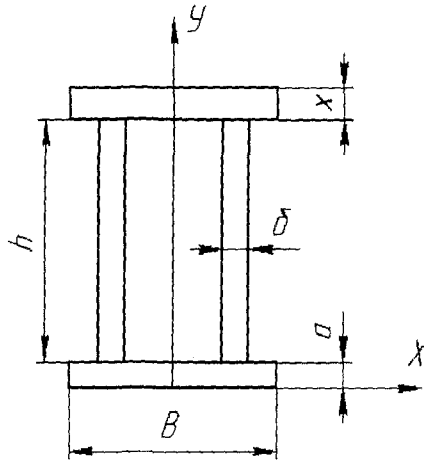


Рисунок 1—Поперечное сечение пролетной балки с поясами разной толщины

Геометрические характеристики сечения примут вид:

$$y_{ц.т.} = \frac{h \cdot \delta \cdot 2 \cdot \left(a + \frac{h}{2} \right) + B \cdot a \cdot 0,5a + B \cdot x \cdot \left(a + h + \frac{x}{2} \right)}{h \cdot \delta \cdot 2 + B \cdot a + B \cdot x};$$

$$J_x = \frac{2h^3}{12} + (y_{ц.т.} - a - 0,5h)^2 \cdot 2h\delta + B \cdot a(y_{ц.т.} - 0,5a)^2 + B \cdot x(y_{ц.т.} - h - a - 0,5x)^2;$$

$$W_x = \frac{J_x}{y_{ц.т.}}$$

где $y_{ц.т.}$ – координата центра тяжести сечения, м; δ – толщина стенки и толщина нижнего пояса, м; B – ширина балки, м.; x – толщина верхнего пояса, м.

$$\frac{M_{x2b}}{W_x} + \frac{M_{y2b}}{W_y} \leq R \cdot \gamma; \quad \frac{M_{x2a}}{W_x} \leq R \cdot \gamma; \quad \frac{L}{18} \leq h \leq \frac{L}{14}; \quad B \geq L/50;$$

$$0,005 \leq \delta \leq 0,015; \quad \frac{h}{3} \leq B \leq \frac{h}{2}; \quad B \geq 0,3; \quad 1,5\delta \leq x \leq 2\delta; \quad 0,005 \leq a \leq 0,01,$$

где $M_{y2b}, M_{x2b}, M_{x2a}$ – изгибающие моменты относительно осей x и y для расчетных случаев IIa и IIб, кНм; R – расчетное сопротивление материала балки изгибу, МПа; γ – коэффициент надежности при расчете по методу предельных состояний; L – пролет крана.

Расчётные значения параметров поперечного сечения, полученных предлагаемым методом, для балок мостовых кранов общего назначения, стандартизованных по ГОСТ 25711-83 сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения параметров поперечного сечения главных балок мостовых кранов

L/Q	5	8	10	12,5	16	20	32	50			
10,5	h=0,5 B=0,3 x=0,008 a=0,005 b=0,005	h=0,5 B=0,3 x=0,008 a=0,005 b=0,005	h=0,52 B=0,3 x=0,008 a=0,005 b=0,005	h=0,56 B=0,3 x=0,008 a=0,005 b=0,005	h=0,59 B=0,3 x=0,008 a=0,007 b=0,005	h=0,63 B=0,3 x=0,008 a=0,008 b=0,005	h=0,74 B=0,32 x=0,009 a=0,009 b=0,006	h=0,78 B=0,39 x=0,01 a=0,01 b=0,008			
	16,5	h=0,6 B=0,33 x=0,008 a=0,005 b=0,005	h=0,69 B=0,33 x=0,008 a=0,005 b=0,005	h=0,74 B=0,33 x=0,008 a=0,005 b=0,005	h=0,81 B=0,33 x=0,008 a=0,005 b=0,005	h=0,84 B=0,33 x=0,008 a=0,007 b=0,005	h=0,88 B=0,36 x=0,008 a=0,008 b=0,005	h=0,99 B=0,41 x=0,009 a=0,009 b=0,006	h=1 B=0,5 x=0,01 a=0,01 b=0,009		
		22,5	h=0,72 B=0,45 x=0,008 a=0,005 b=0,005	h=0,83 B=0,45 x=0,008 a=0,005 b=0,005	h=0,89 B=0,45 x=0,008 a=0,005 b=0,005	h=0,96 B=0,45 x=0,008 a=0,005 b=0,005	h=1 B=0,45 x=0,008 a=0,006 b=0,005	h=1,1 B=0,45 x=0,008 a=0,007 b=0,005	h=1,2 B=0,5 x=0,009 a=0,009 b=0,006	h=1,47 B=0,59 x=0,009 a=0,009 b=0,006	
			28,5	h=0,76 B=0,57 x=0,009 a=0,006 b=0,006	h=0,88 B=0,57 x=0,009 a=0,006 b=0,006	h=0,95 B=0,57 x=0,009 a=0,006 b=0,006	h=1 B=0,58 x=0,009 a=0,006 b=0,006	h=1,12 B=0,58 x=0,009 a=0,006 b=0,006	h=1,22 B=0,57 x=0,009 a=0,006 b=0,006	h=1,33 B=0,57 x=0,01 a=0,008 b=0,008	h=1,41 B=0,65 x=0,01 a=0,012 b=0,01
				34,5	h=0,85 B=0,69 x=0,009 a=0,006 b=0,006	h=1 B=0,69 x=0,009 a=0,006 b=0,006	h=1,1 B=0,69 x=0,009 a=0,006 b=0,006	h=1,15 B=0,69 x=0,009 a=0,006 b=0,006	h=1,25 B=0,69 x=0,009 a=0,006 b=0,006	h=1,36 B=0,69 x=0,009 a=0,006 b=0,006	h=1,48 B=0,69 x=0,012 a=0,008 b=0,008

На рис. 2-4 представлены графики зависимости площади поперечного сечения балки от грузоподъёмности крана при разных значениях пролёта L, для симметричных сечений и для сечений с различной толщиной поясов.

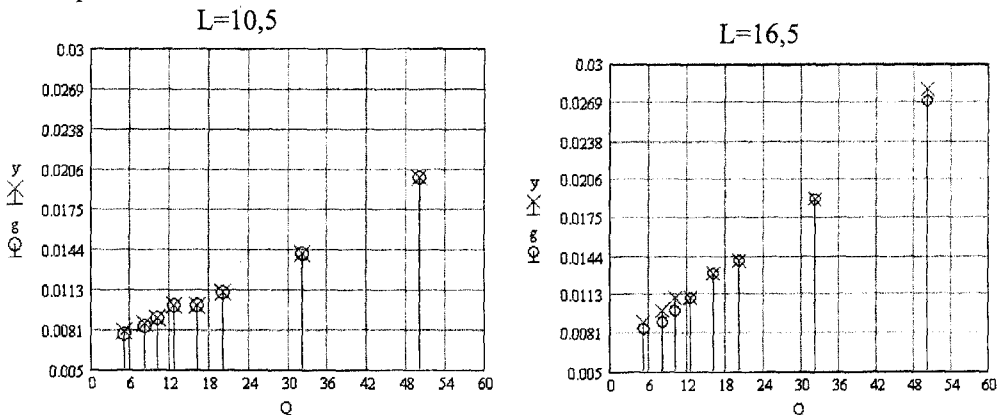


Рис. 2. Графики зависимости площади поперечного сечения балки от грузоподъёмности крана для пролётов $L=10,5$ и $16,5$ м
 y – поперечное сечение с поясами равной толщины;
 g – поперечное сечение с разными толщинами поясов

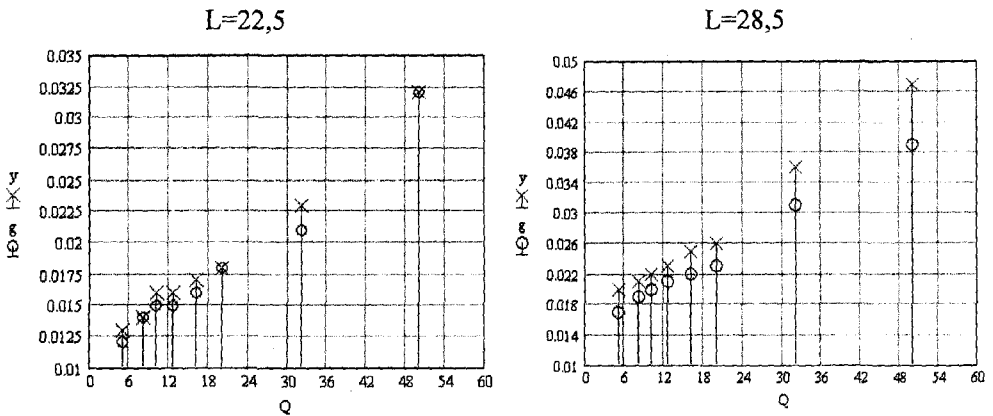


Рис. 3. Графики зависимости площади поперечного сечения балки от грузоподъёмности крана для пролётов $L=22,5$ и $28,5$ м
 y – поперечное сечение с поясами равной толщины;
 g – поперечное сечение с разными толщинами поясов

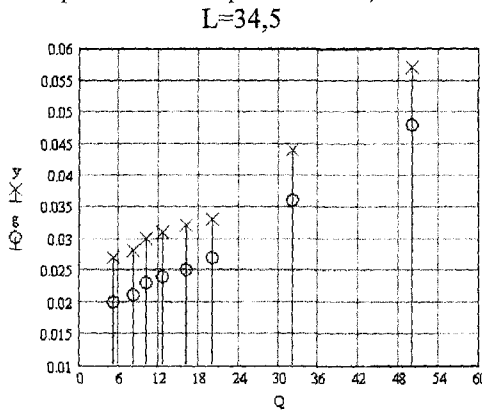


Рис. 8. График зависимости площади поперечного сечения балки от грузоподъёмности крана для пролётов $L=34,5$ м
 y – поперечное сечение с поясами равной толщины;
 g – поперечное сечение с разными толщинами поясов

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Для кранов грузоподъёмностью от 10 т до 50 т при пролёте 10,5 м расчёт по предложенной и существующей методике дают аналогичные результаты.
2. Для кранов грузоподъёмностью от 10 т до 50 т при пролёте 16,5 м выигрыш наблюдается в диапазоне грузоподъёмностей от 32 до 50 т.
3. Для кранов грузоподъёмностью от 10 т до 50 т при пролётах 22,5, 28,5, 34,5 м выигрыш составляет от 6 до 10% практически на всем диапазоне грузоподъёмностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлические конструкции ПТМ / Под ред. М.М. Гохберга. Л.: Машиностроение, 1976. 456с.
2. Справочник по кранам / Под ред. М.М. Гохберга Л.: Машиностроение, 1988. Т.1. 535с.
3. Металлические конструкции ПТМ / С.А. Соколов СПб.: Политехника, 2005. 423с.

Анцев Виталий Юрьевич

Тульский государственный университет, г. Тула.

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Подъёмно-транспортные машины и оборудование»

Тел. (4872) 33-22-88

anzev@tsu.tula.ru

Толоконников Александр Сергеевич

Тульский государственный университет, г. Тула.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование»

Тел. (4872) 33-22-88

tolkac@rambler.ru

Калабин Павел Юрьевич

Тульский государственный университет, г. Тула.

Магистрант кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование»

Тел. (4872) 33-22-88

kalabiny@rambler.ru

УДК 621.893

А. О. ГОРЛЕНКО, М. Л. КЛЮШНИКОВ

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Описаны экспериментальная установка и методика триботехнических испытаний подшипников качения и скольжения при использовании различных марок пластичных смазочных материалов.

***Ключевые слова:** смазочный материал; пара трения; коэффициента трения качения, система сбора данных, подшипники качения и скольжения, триботехнические испытания.*

Describe the experimental setup and methodology of studies of wear of rolling bearings and sliding when using different brands of plastic lubricants.

***Keywords:** lubricant; friction pair; constant of rolling friction, data gathering system, frictionless bearings, tribotechnical tests.*

Несмотря на то, что решением задач, связанных с проблемой повышения работоспособности трибосопряжений за счет использования смазочных материалов с различными добавками активно занимаются известные специалисты и многочисленные организации в нашей стране и за рубежом [1, 6], проблема, несомненно, все еще актуальна.

Анализ результатов использования этих материалов с добавками при стендовых испытаниях и в условиях эксплуатации машин не дает однозначного ответа о безусловной пользе той или иной добавки. В основном повышение износостойкости трибосопряжений достигается за счет снижения потерь энергии на преодоление трения, одновременно снижается расход топлива и смазочных материалов, но в то же время эти смазочные материалы могут вызывать коррозию деталей, обладать высокой стоимостью или требовать частой возобновляемости. В ряде случаев их защитные пленки плохо отводят теплоту из зоны трения [2]. Тем не менее, ввод присадок в смазочные материалы, а особенно пластичные, является наиболее доступным способом повышения износостойкости смазываемых деталей машин, из которых в качестве объекта исследования был выбран, в частности, подшипник качения №204 (ГОСТ 520-89). Кроме того, отсутствие точных физических моделей взаимодействия доработанных смазочных материалов с поверхностями трения [3, 4] позволяет более плотно рассматривать названные процессы.

Изучение вопроса требует определенное техническое оснащение, в связи с чем была

разработана и введена в эксплуатацию конструкция испытательного блока (рис. 1), который монтируется на станине серийной машины трения МИ-1М без существенных изменений в ее конструкции. Для обработки сигналов, получаемых с датчиков, в режиме постоянного времени, а также для повышения эффективности и качества экспериментальных исследований была использована автоматизированная система научных исследований (АСНИ). АСНИ состоит из испытательного блока, блоков привода и нагружения, датчиков, мобильного измерительного комплекса, ЭВМ и разработанного программного обеспечения.

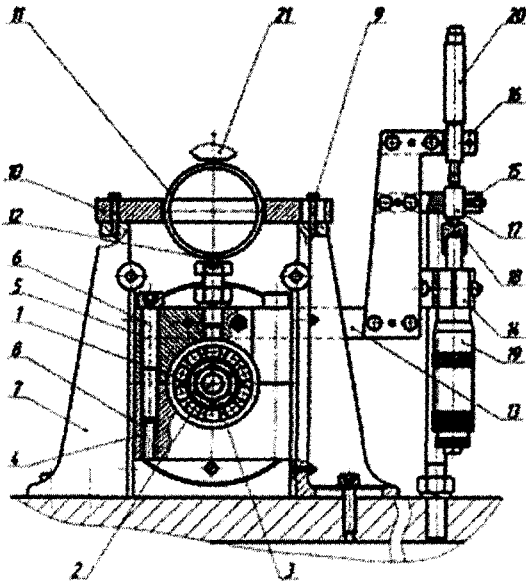
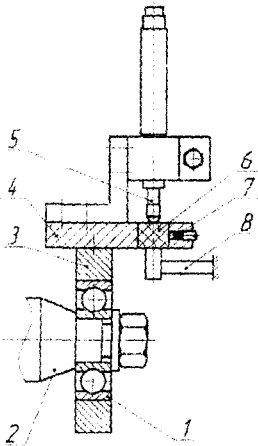


Рисунок 1 - Испытательный блок

1-испытуемый подшипник; 2-вал шпинделя; 3-гайка М12-6Н.5; 4- нижний сухарь; 5- верхний сухарь; 6- винт М8-6g×60.68; 7- стойка; 8-направляющая; 9-винт М6-6g×25.68; 10-планка; 11- тензocolьцо; 12- Шарик ГОСТ 3722-81; 13- штанга; 14- державка упора; 15 - державка компенсатора; 16 - державка датчика износа; 17- компенсатор; 18- регулируемый упор; 19- микрометр; 20- датчик износа; 21- блок нагружения.

В качестве датчика момента трения используется маятниковый моментомер. Чувствительность маятникового датчика регулируется с помощью набора сменных грузов. Для измерения угла отклонения маятника установлен датчик перемещения, представляющий собой тензобалку. Для непрерывного измерения величины линейного сближения по мере износа подшипника качения использована схема, представленная на рис. 2.



При вращения вала шпинделя 2 вращается внутреннее кольцо испытуемого подшипника 1. При этом верхний сухарь 3 вместе со штангой 4 и индуктивным датчиком износа 5 совершает периодические перемещения в вертикальной плоскости с амплитудой, равной величине радиальных биений. Компенсатор 6 вместе с сухарем 3 и подшипник 1 беспрерывно перемещается в верхнее положение, а не доходя до нижнего положения, встречает на своем пути упор 8.

Рисунок 2 - Схема измерения линейного сближения в процессе испытаний

1-испытуемый подшипник; 2- вал шпинделя; 3- верхний сухарь; 4- штанга; 5 - датчик износа; 6 - компенсатор; 7- пружина; 8- регулируемый упор

В результате их взаимодействия компенсатор 6 сместится относительно сухаря на величину, равную амплитуде колебаний, вызванных радиальным биением образца. Пружина 7 зафиксирует новое положение компенсатора относительно индентора. В этот момент фиксируется нуль датчика износа 5. Аналогичным образом компенсируется тепловое расширение образца. Так как корпус датчика износа, связанный с сухарем, и щуп, связанный с компенсатором, имеют равные по величине и направлению перемещения, то на регистрирующий прибор не поступает сигнал, вызванный радиальными биениями и тепловым расширением образца. При изнашивании подшипника компенсатор, увлекаемый верхним сухарем, взаимо-

действует с упором и смещается на величину износа образца. Тогда шуп сместится относительно корпуса датчика износа, а регистрирующее устройство запишет процесс изнашивания во времени.

Питание датчиков и регистрация поступающих с них сигналов производится системой сбора данных в АСНИ. Она включает мобильный измерительный комплекс систему согласования SC-2345 и плату сбора данных М-серии PCI 6220 производства National Instruments.

Программное обеспечение АСНИ разработано в среде программирования NI LabVIEW 7 [5]. Программа содержит модули ввода исходных данных, тарировки датчиков и установки нуля, обработки и визуализации данных и обеспечивает отображение на мониторе измеряемых параметров (нагрузки, коэффициента трения, линейного износа образца, пути трения) в виде графиков в реальном времени. После испытаний автоматически генерируется отчет в формате HTML и создается ячейка в единой базе данных, которая включает набор данных, сформированных с учетом ГОСТ 30858-2003: исходные параметры эксперимента, максимальные и средние значения интенсивности изнашивания ($i_{h\max}^0, i_h^0$), коэффициента трения (f_{\max}^0, f^0) в период приработки, средние значения интенсивности изнашивания (i_h), коэффициента трения (f) в период нормального изнашивания, общий путь трения (L) и путь приработки (L^0), а также комплекс $\left(\frac{i_h}{i_h^0}, \frac{f}{f^0}, \frac{T}{T^0}, \frac{L^0}{L} \right)$.

Методика испытания подшипников качения с пластичным смазочным материалом проводилась в следующей последовательности.

1. Перед испытанием, подшипники тщательно промывались, обезжиривались, просушивались и смазывались индустриальным маслом И-20А. Затем каждый подшипник устанавливался в подшипниковый узел стенда и испытывался при одинаковой нагрузке с фиксацией крутящего момента. Подшипники, имеющие одинаковый крутящий момент после приработки с последующим обезжириванием и сушкой, использовались для дальнейших исследований.
2. Каждый из отобранных для испытаний подшипников, заполнялся определенным смазочным материалом на $\frac{1}{2}$ свободного объема подшипника.
3. Испытуемый подшипник, заполненный смазочным материалом, устанавливался в подшипниковый узел стенда.
4. Все датчики и регистрирующие приборы подключались к ПК через соответствующие разъемы.
5. Включался ПК. Далее следовали указания программы, в соответствии с которыми вводились исходные данные и устанавливались на нуль датчики.
6. Включался электродвигатель, образец нагружался до заданного уровня нагрузки.
7. Испытания пары подшипников на износ проводились с перерывами в течение 48 ч.
8. Запись данных (износ, общий момент сопротивления, температура) по окончании испытаний останавливалась кнопкой «СТОП» в окне программы.
9. Выбег подшипников фиксировался счетчиком оборотов при отключении электродвигателя (перед началом испытаний и после 48 ч работы).

Для сравнения первоначальных данных были отобраны смазочные материалы, основные физико-химические характеристики которых представлены в табл.1 [7].

Таблица 1 - Физико-химические характеристики пластичных смазочных материалов

Показатель	Литол-24 (ГОСТ 21150-87)	CASTROL LMX	ХАДО (суперсмазка)	ХАДО (восстано- вительная)	ХАДО (для ШРУС)
Цвет	Светло- желтый с коричневы м оттенком	Темно- зеленый	Светлый с желтоватым оттенком	Светло- зеленый	Светло- янтарный
Класс консистенции NLGI	2	2	2	3	2
Температура каплепадения, °С	>185	>250	>189	>193	>280
Пенетрация при 25 °С	220-250	265-295	280	255	275
Рабочая температура, °С	<150	<170	<150	<150	<165

Результаты исследований по приведенной методике показали, что наилучшими антифрикционными свойствами для подшипников качения, выбранных в качестве объектов исследований, обладают смазочные материалы CASTROL LMX и ХАДО (восстановительная).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Балабанов, В. И. Безразборное восстановление трущихся соединений автомобиля.
- 2 Методы и средства. – М.: «Астрель». - 2006. - 96 с.
- 3 Кузьмин, В. Н., Погодаев, Л. И. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ДОБАВКАМИ (Проблемы и перспективы) Трение, износ, смазка, т. 11, №1.- 2009
- 4 Погодаев, Л. И. Влияние геомодификаторов трения на работоспособность трибосопряжений // ПМ и НМ, N 1, 2005. – С. 58-67.
- 6 Погодаев, Л. И., Кузьмин, В. Н., Дудко, П. П. Повышение надежности трибосопряжений. – СПб.: Академия транспорта РФ, 2001. – 304 с.: ил.
- 8 Прудников, М.И. Метод триботехнических испытаний цилиндрических поверхностей трения / М.И. Прудников // Вестн. БГТУ. - 2008. - №2. - С. 48-56.
- 9 Шабанов, А. Ю. Очерки современной автохимии. Мифы или реальность? -- СПб.: Иван Федоров, 2004.- 216 с., ил.
- 10 Масла, смазки, ревитализаторы, спецжидкости, автохимия: каталог // ХАДО. Энерго- и ресурсосберегающая технология.- 2007.- 144 с.

Горленко Александр Олегович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Триботехнология»

Тел. (4832) 58-82-79

E-mail: trt@tu-bryansk.ru

Клюшников Михаил Леонидович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Ассистент кафедры «Триботехнология»
Тел. (4832) 58-82-79
E-mail: trt@tu-bryansk.ru

УДК 621.9.06:681.3.068

П.В. ИГНАТОВ

ОБЪЁМНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕСС-ФОРМ И ОБЛАСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Выполнен обзор видов промышленных средств компьютерного моделирования. Составлено описание объёмного компьютерного моделирования специальной технологической оснастки. Указаны области эффективного применения методов объёмного компьютерного моделирования в инструментальном производстве.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; специальная технологическая оснастка; инструментальное производство

Is executed the survey of appearances the industrial means of computer modeling. The description the capacious computer modeling the special technological rigging is put together. The fields of effective application the methods of capacious computer modeling in the instrumental production is show.

Key words: computer modeling; special technological rigging; instrumental production

Виды промышленных средств компьютерного моделирования

Для современного производства характерно использование компьютерной техники на базе так называемых систем CAD/CAM, CAE. Система автоматизированного проектирования CAD (Computer Aided Design) – компьютерная помощь проектированию, система CAM (Computer Aided Manufacturing) – компьютерная помощь производству, система CAE (Computer Aided Engineering) – компьютерная помощь инженерии в области проектных и конструкторских расчётов, контроля и управления. Согласно работе [1], внедрение на промышленном предприятии, системам автоматизированного проектирования CAD/CAM, CAE, создаёт предпосылки для создания компьютерно-интегрированного производства (КИП).

В нашей стране системы CAD/CAM, CAE определены, как системы автоматизированного проектирования или автоматизированные системы технологической подготовки производства (системы САПР/АСТПП), а также автоматизированные системы управления производством (системы АСУП). Работа в системах CAD/CAM, CAE предполагает использование принципа параллельного инжиниринга, при осуществлении которого структура изделия разрабатывается и рассчитывается инженером-конструктором, внешний вид моделируется художником-дизайнером, а вопросы технологической подготовки производства практически одновременно с началом проектно-конструкторских и оформительских работ рассматриваются инженерами-технологами. Системы автоматизированного проектирования обеспечивают быстрый обмен замечаниями между всеми перечисленными группами специалистов, согласование и оптимизацию конструкции и технологии, при необходимости – оперативное внесение изменений в разрабатываемый проект и их согласование с другими видами работ, имеющими отношение к основной задаче. Непосредственно в процессе работ возможно быстрое проектирование нескольких вариантов разрабатываемых изделий с одновременной автоматической разработкой управляющих программ для технологического оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) для выпуска опытной партии. Автоматизация конструкторско-технологических работ с использованием систем CAD/CAM, CAE позволяет

объединить в единое целое всю работу предприятий, использующих средства автоматизации. Такие системы получили название PDM (Product Data Management) – автоматизированные системы управления проектными данными и информацией об изделии [1, 2].

Использование предприятиями систем CAD/CAM, CAE позволяет избежать не только дорогостоящего метода «проб и ошибок», но и существенно сократить продолжительность технической подготовки производства, заменив полностью или частично традиционные расчётные инженерные методы оценки соответствия конструкций изделий требованиям технологичности и собираемости. Об одной из подобных областей эффективного применения систем проектирования CAD/CAM, CAE – моделировании процесса изготовления и сборки пресс-форм, снижающем потребности в относительно сложном и достаточно трудоёмком процессе расчёта размерных цепей – приведено повествование в настоящей работе.

Описание процесса объёмного моделирования пресс-форм

Использование в машиностроительном производстве объёмного компьютерного моделирования проектируемых приспособлений в настоящее время приводит к сокращению времени, необходимого на разработку технологических процессов, продолжительности экспертизы проекта, и, в итоге, сроков технической подготовки производства. Конструктор при проектировании какой-либо технологической оснастки (пресс-формы, штампа и т.д.), создавая помимо 2D-модели чертежа (плоского или двухкоординатного чертежа) изготавливаемого приспособления, может создать объёмные виртуальные модели каждой детали конструкции. Конечно, объёмное компьютерное моделирование проектируемых приспособлений увеличит формальную продолжительность технической подготовки производства, однако её фактическая продолжительность может значительно сократиться за счёт уменьшения затрат, возникающих вследствие ошибок, допущенных инженером при проектировании.

Процесс объёмного компьютерного моделирования пресс-форм начинается с вычерчивания плоских чертежей деталей и построения их 3D-моделей. Затем 3D-модели всех деталей пресс-формы виртуально собираются в единое приспособление (рисунок 1).

Сборка необходима для определения и уточнения габаритных размеров всех деталей: уточнения размеров плит, длины толкателей, длины крепежных элементов, проверки собираемости основных деталей и узлов пресс-формы, уточнения функциональных размеров и допусков, определения степени безопасности извлечения обрабатываемых деталей из пресс-формы, проверки выполнения технических требований к точности изделия.

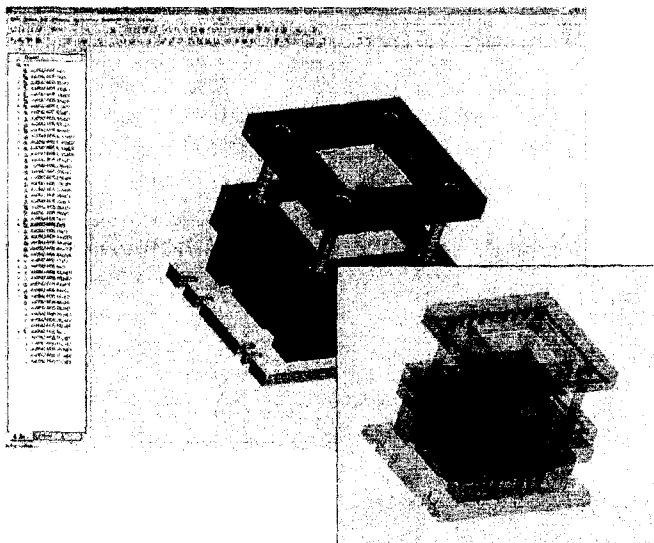


Рисунок 1 – Проверка собираемости основных деталей и узлов в ADEM Assembly

Контрольный пример

В качестве примера эффективного использования объёмного компьютерного моделирования для сборки пресс-формы рассмотрим моделирование процесса сборки деталей «Обойма подвижная» и «Толкатель» (детали пресс-формы). Процесс «виртуальной сборки» данных деталей показан на рисунке 2. На этом рисунке отчётливо видны места соединений, на которых поверхности моделей деталей пересекаются или «наезжают»; в программе ADEM Assembly подобные участки выделяются красным цветом.

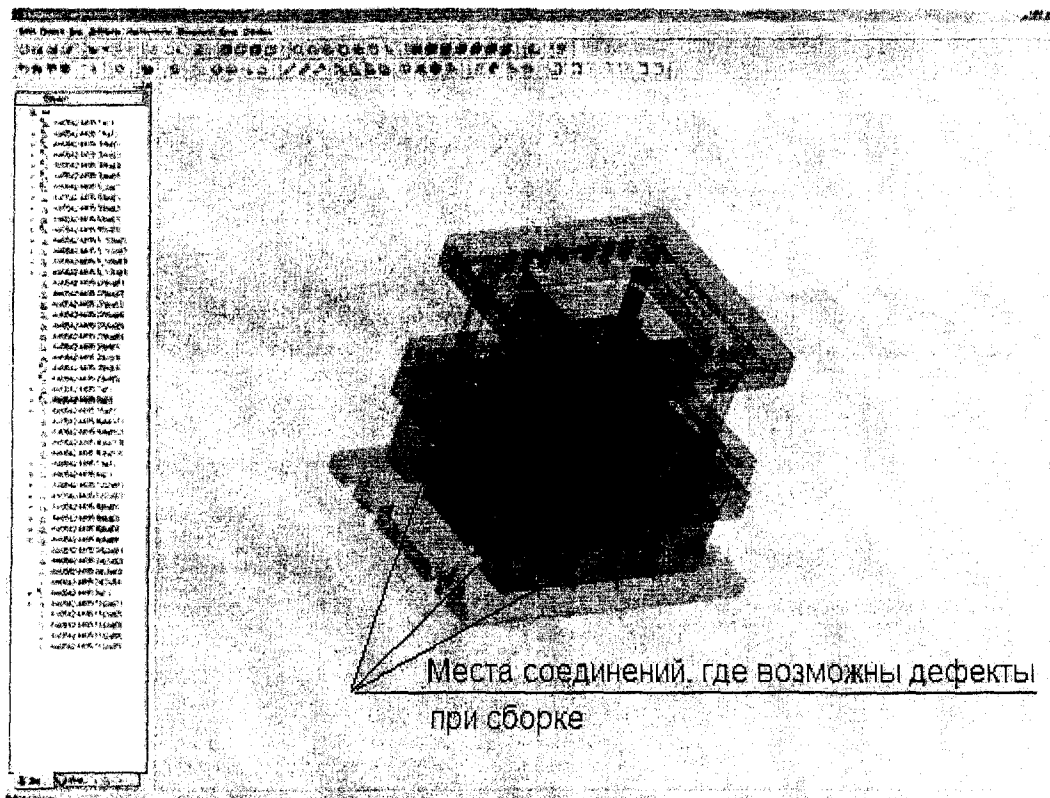


Рисунок 2 – Моделирование процесса сборки деталей «Обойма подвижная» и «Толкатель» в ADEM Assembly

Рассмотрим один из узлов, где имеются места (закрашенные красным цветом) пересечения сопрягаемых поверхностей. Выберем узел «Блок подвижный», детали «Обойма подвижная» и «Толкатель» (рисунок 3). Измерим смещение оси толкателя относительно оси отверстия подвижной обоймы; значение смещения составляет 0.2 мм. После проведения процедуры «перемещение», получим отредактированный вариант.

После отслеживания и исправления всех возможных дефектов сборки деталей и узлов, уточнения и установки допусков размеров, правильного соединения подвижной и неподвижной частей, а также достаточного и необходимого «расхождения» пресс-формы для снятия обрабатываемых деталей, приступаем к крепёжным деталям (плиты, болты), направляющим (втулки, колонки), а также к узлу подвода заливаемой пластической массы.

Выбор втулок, колонок и детали узла подвода массы производится из архива параметрических стандартных элементов «Детали пресс-форм».

Таким образом, используя всю функциональность новейшего модуля ADEM Assembly, пользователь получает возможность проведения целого спектра работ по компоновке конструкции (в данном случае пресс-формы со всем множеством элементов), проверке на собираемость, и, что самое главное, выпуску соответствующей документации (спецификаций, техпроцесса сборки) по готовым объёмным моделям.

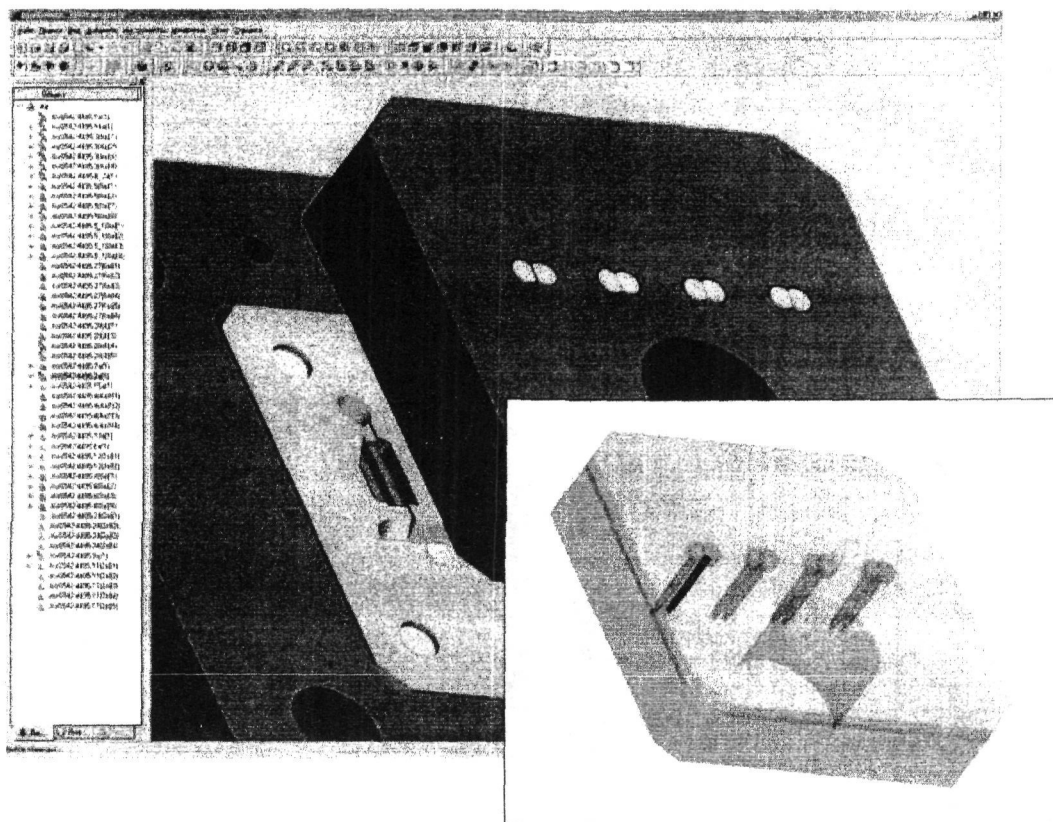


Рисунок 3 – Проверка собираемости деталей «Обойма подвижная» и «Толкатель» в ADEM Assembly

Области применения объёмного компьютерного моделирования

Объёмное компьютерное моделирование пресс-форм может достаточно широко использоваться в инструментальном производстве, особенно с учётом его единичного характера. В отличие от серийно выпускаемых изделий, для которых затраты на подготовку производства меньше затрат на изготовление продукции, средства технологического оснащения изготавливаются в небольшом количестве, и проблема уменьшения трудоёмкости проектирования конструкции и технологии изготовления приспособлений является актуальной.

При проектировании специальных приспособлений значительную трудоёмкость имеют инженерные расчёты, подтверждающие пригодность конструкции для изготовления и сборки. Одним из подобных расчётов является расчёт размерных цепей приспособления.

Расчёт и анализ размерных цепей позволяет: установить количественную взаимосвязь между размерами деталей приспособления и уточнить номинальные значения и допуски взаимосвязанных размеров, исходя из эксплуатационных требований и экономической точности обработки деталей и сборки приспособления; определить наиболее рентабельный вид взаимозаменяемости (полная или неполная); добиться наиболее правильной простановки размеров на рабочих чертежах; определить операционные допуски и пересчитать конструктивные размеры на промежуточные технологические размеры [3].

Анализ возможностей компьютерного моделирования процесса сборки пресс-форм показывает, что многие традиционные расчётные методы проверки правильности результатов проектирования приспособлений можно успешно дополнить или даже полностью заменить компьютерным моделированием, которое не только позволит решить поставленные задачи, но и обеспечит наиболее эргономичный и удобный способ их решения.

Не следует считать, что компьютерное моделирование делает ненужными методы расчёта размерных цепей. Расчёт размерных цепей – важнейшая проектно-конструкторская задача, и методы её решения должен знать каждый инженер. Однако, во многих случаях, применение объёмного компьютерного моделирования может значительно уменьшить трудоёмкость расчётных методов и сделать процесс проектирования более интересным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Серебrenицкий, П.П. Общетехнический справочник [Текст]. – СПб.: Политехника, 2004. – 445 с.
- 2 Интернет-каталог. Системы CAD/CAM/CAE/GIS [Электронный ресурс] // <http://www.cad.dp.ua/stats/cads.htm>.
- 3 Якушев, А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения [Текст] / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

Игнатов Павел Викторович

Карачевский филиал ОрелГТУ, г. Карачев Брянской области
Преподаватель кафедры «Технология машиностроения»,
ФГУП «Карачевский завод «Электродеталь»
Инженер-конструктор
Телефон: (48335)2-46-70; E-mail: pms35vm@yandex.ru

УДК 38.9+54-74:622

ЛЕОНЕНКО Н.А., ВАНИНА Е.А., ГАЛЬЦОВ А.А.,
КАПУСТИНА Г.Г., ШВЕЦ Н.Л.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИЕ ДИСПЕРСНЫЕ СРЕДЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

Исследовано воздействие импульсного и непрерывного лазерного излучения на минеральные среды, объекты россыпных месторождений, содержащие золото, не извлекаемое гравитационными методами. Установлено образование различных структурных поверхностей золота, выявлены общие закономерности агломерирования и концентрирования субмикронного золота.

Ключевые слова: лазерное излучение, ультрадисперсное золото, золотосодержащий минеральный продукт, структурная упорядоченность.

Object of researches is laser-induced and continuous laser radiation sources on the mineral samples, the objects of alluvial layers, which contain gold, not extracted by gravitational methods. The formation of different structural surfaces of gold is established, general laws governing agglomeration and concentration of sub-micron gold are revealed. It is show the mathematical simulation of laser agglomeration disperse gold.

Keywords: laser-induced, ultra dispersed gold, gold-bearing mineral products, the structural ordering.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В последнее время все более актуальными становятся задачи, связанные с воздействием мощных потоков энергии на вещество с целью исследований поведения веществ в экстремальных условиях и разработки новых технологических решений в промышленности. Для дальневосточного региона, являющегося одним из основных золотодобывающих рай-

онов России, вовлечение в переработку техногенных золотосодержащих новообразований, накопленных за длительный исторический период золотодобычи, является весьма актуальным. Известно, что благородные металлы, имеющие размеры менее 20 мкм, пластинчатую или игольчатую форму, извлечь традиционными способами практически невозможно. В связи с этим возникает интерес к исследованию способов, основанных на нетрадиционных энергетических воздействиях [1-6].

К числу нетрадиционных методов энергетического воздействия относятся: электрохимическая, СВЧ-, электроимпульсная, электрогидродинамическая, магнитно-импульсная обработка, воздействие потоком ускоренных электронов, сверхмощными гиперударными волнами и мощными электромагнитными импульсами [1]. В настоящий момент наиболее перспективным из этих методов является обработка минеральных концентратов лазерным излучением. Это объясняется тем, что лазерное излучение позволяет обеспечивать высокие скорости локальных изменений температуры в облучаемой среде и градиенты температуры, как на узко локализованных участках поверхностей, так и по глубине материалов из-за малой теплопроводности. Такие параметры не могут быть достигнуты при других способах воздействия.

Вместе с тем известно, что свойства микронных объектов и наноиндивидов отличаются от свойств их макрогомологов. Связано это с зависимостью удельной поверхности частиц от их размера и, следовательно, с несравнимо более высоким структурным совершенством и с поверхностными эффектами. Такими свойствами являются тепловые, электрические, магнитные, высокая агрегативная устойчивость. Например, температура плавления макрозерен золота 1064 °С, а наноиндивидов величиной 4 нм – 427 °С. Свойства наночастиц даже одного размера будут различаться в зависимости от среды, в которой они находятся. Это следствие неизбежного взаимодействия атомов наночастиц и окружающей среды, а такое взаимодействие для наночастиц гораздо сильнее, чем для микрочастиц. Чем более сильно взаимодействие со средой, тем сильнее отличия в свойствах отдельных частиц и частицы, находящейся в определенной среде. Например, свойства наночастиц золота в вакууме, на воздухе и, к примеру, в ассоциации с тяжелыми минералами высокоглинистых песков россыпей будут значительно отличаться. Это обстоятельство имеет особое значение для решения минералого-технологических задач, в разработке приемов извлечения ультрадисперсных минералов и наночастиц, рассеянных в минеральной матрице [2].

Таким образом, исследование быстропротекающих термических процессов в дисперсных золотосодержащих средах с целью разработки новых нетрадиционных методов извлечения труднообогатимых ценных компонентов из минерального сырья вполне может быть перспективным и актуальным.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе применены три источника инфракрасного лазерного излучения (ЛИ). Характеристики источников излучения сведены в таблицу: "Скат 301" - импульсный твердотельный YAG:Nd³⁺ с частотой повторения импульсов до 100 Гц и длительностью светового импульса от 150 мкс до 1 мс; "Квант - 15" - импульсный твердотельный YAG:Nd³⁺ - с длительностью импульса от 10 мкс до 100 мс, с частотой повторения импульсов до 5 Гц с пиковой мощностью от нескольких МВт до 1.2 ГВт, а так же иттербиевая лазерная установка с волоконной системой передачи лазерного излучения ЛС-06. Мощность 600 Вт. Режим работы непрерывный, модуляция до 3 кГц. Спектральная ширина 10 нм. Длина волны $\lambda = 1070$ нм.

Исследовано воздействие ЛИ на минеральные алюмосиликатные среды (объекты россыпных месторождений), содержащие дисперсное золото, не извлекаемое гравитационными технологическими методами.

Таблица – Характеристики источников лазерного излучения

Источник ЛИ	Тип лазерного источника	Частота повторения импульсов, Гц	Мощность, Вт	Энергия в импульсе, Дж	Длительность импульсов, мкс	Время лазерной обработки t, мин
Скат 301	Импульсный, твердотельный Nd:YAG	100	200	1	150 мкс – 1мс	2
Квант 15	Импульсный, твердотельный Nd:YAG	5	300	8	10 мкс – 100 мс	0,3
ЛС-06	Оптоволоконный иттербиевый непрерывный источник	-	От 0 до 600	-	-	0,3

В результате лазерного воздействия по данным микроскопического анализа зарегистрировано образование укрупненного золота сферически агломерированных форм на алюмосиликатной матрице.

Электронно-микроскопические исследования образцов проведены на растровом электронном микроскопе “LEO EVO 40HV” (Карл Цейс, Германия), оснащенный энергодисперсионным анализатором “INCA-ENERGY”.

Исследование минералогических объектов с использованием детектора вторичных электронов (SE-детектор) позволило получить информацию о топографии образцов. Дополнительно к детектору вторичных электронов (SE-детектор) применен детектор обратно рассеянных электронов (QBS-детектор). С помощью QBS-детектора фазы с более высоким средним атомным числом при получении изображений отражаются в контрасте более ярко по сравнению с фазами с меньшим атомным числом. Поскольку разность атомных весов золота и минералов, содержащихся в исследуемых минералогических объектах велика, получается более контрастное изображение, позволяющее визуально выявлять золото. Выявлено рельефное отличие агломерированных поверхностей золота при воздействии импульсного и непрерывного энергетического ЛИ.

Для проведения локального качественного и количественного химического анализа минералогических объектов применен энергодисперсионный спектрометр (FDX) “INCA-ENERGY”. Чувствительность метода составляет ~ 0,1%. Ширина электронного пучка ~ 20-30 нм. Глубина проникновения электронного пучка ~ 1 мкм.

Агломерирование золота подтверждено локальным спектральным анализом. Также выявлены качественные и структурные различия рельефа поверхностей, которые изображены на рисунках 1 и 2.

Такие различия связаны с газодинамическими процессами, происходящими при короткоимпульсном воздействии, миллисекундной длительности, и при более длительном временном воздействии (от 1 до 20 с.) от непрерывного источника ЛИ. Рельеф поверхности агломерированного золота в первом случае (импульсный источник ЛИ) имеет менее шероховатую поверхность (рисунок 1 – увеличение от 250 до 11000), в отличие от поверхности агломерированного золота, (рисунок 2 – увеличение от 40 до 5960), образованного во втором случае: непрерывный источник ЛИ.

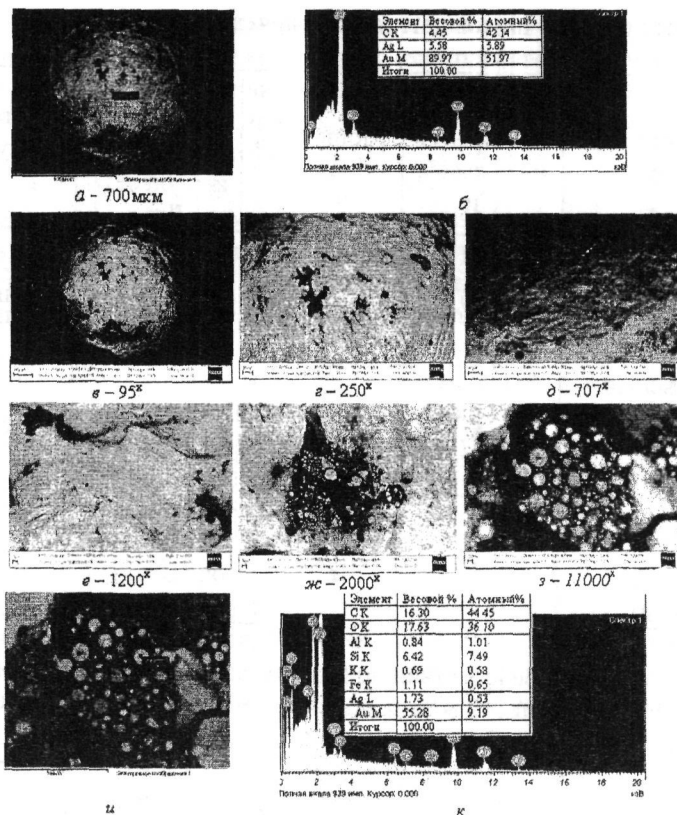


Рисунок 1 – Растровые изображения агломерированного золота сферической формы и исследованные участки ее поверхности после воздействия импульсного источника лазерного излучения

а – изображение агломерата размером 700 мкм, с отмеченной областью элементного анализа; б – спектрограмма и данные элементного энергодисперсионного анализа области, отмеченной на изображении а; в – з – изображения различных поверхностей агломерата золота при соответствующих увеличениях; и – изображения нанометрических объектов с отмеченной областью элементного анализа; к – спектрограмма и данные элементного энергодисперсионного анализа области, отмеченной на изображении и.

Риски: 500 мкм – а, 100 мкм – в, 20 мкм – г, 10 мкм – д, 2 мкм – е,

1 мкм – ж, 200 нм – з, 5 мкм – и.

Газодинамические процессы, происходящие при быстропотекающих термических воздействиях импульсного и непрерывного лазерного излучения приводят к разрыву сплошности среды на агломерированных поверхностях золота. Но формы таких разрывов имеют различную структуру и зависят от режима лазерной обработки золотосодержащих дисперсных объектов. При импульсном режиме – на поверхностях агломерированного золота выявлены отверстия неправильной формы (рис.1 - ув. 250, 2000). По краям газовых отверстий присутствуют ожелезненные алюмосиликаты (рис.1 - ув. 1100; 2000 – темный фон) с нанометрическими золотосодержащими включениями.

В случае обработки золотосодержащей дисперсной среды непрерывным лазерным излучением наблюдается образование газовых отверстий округлой формы. Визуально видна сильная шероховатость поверхности агломерированного золота (рис 2. – ув. 194, 1210), вместе с тем наблюдается структурная упорядоченность образовавшейся гофрированной поверхности агломерированного золота, вероятно, за счет высокотемпературных газодинамических потоков (рис 2. – ув. 5960).

Таким образом, при лазерной обработке золотосодержащего минерального сырья различными источниками ЛИ, установлен характер быстропотекающих процессов, приводящий к образованию различных структурных поверхностей золота, а также выявлены общие

закономерности агломерирования и концентрирования ультрадисперсного золота, не извлекаемого гравитационными методами.

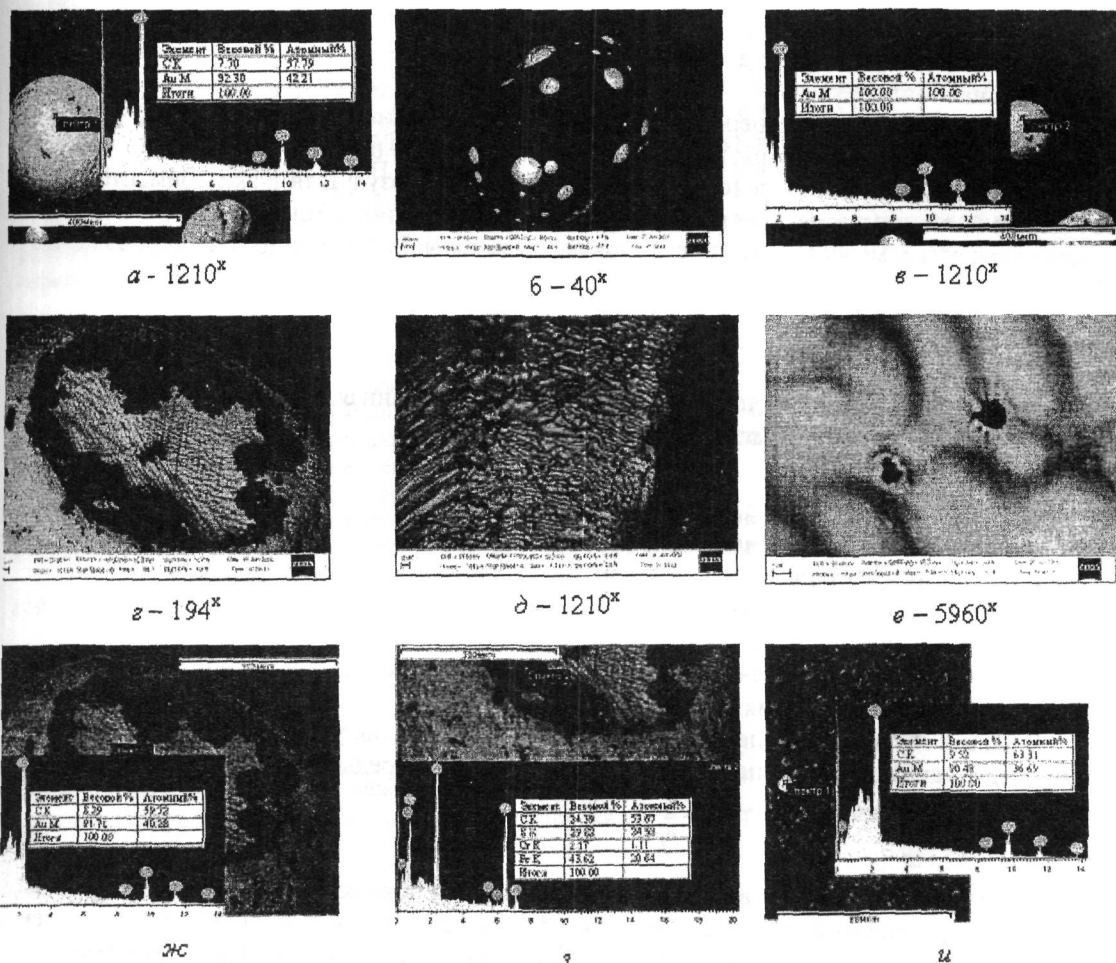


Рисунок 2 – Растровые изображения агломерированного золота сферической формы и исследованные участки ее поверхности после воздействия непрерывного источника лазерного излучения ЛС-06

Риски: 400 мкм – а, в, 300 мкм – ж, з, 100 мкм – б, 60 мкм – и, 20 мкм – г, 2 мкм – д, 1 мкм – е.

После лазерной обработки в образцах происходит формирование обожженных сфероподобных агломератов из глинистых, алюмосиликатных частиц диаметром от 500 до 1500 мкм. Одновременно с этим регистрируется осаждение на них частиц золота сферической формы с размерами от 100 до 500 мкм, то есть в процессе лазерного воздействия происходит агломерация частиц расплавленного золота [6, 7].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

Эффективность процессов лазерной агломерации дисперсного золота во многом зависит от распределения температурного поля в облучаемом образце, которое, в свою очередь, определяется параметрами лазерного излучения.

Задача о нахождении температурного поля в некотором объеме, нагреваемом источником лазерного излучения, решалась на основе дифференциального уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности;

ρ – плотность облучаемого материала;

c – удельная теплоемкость;

$a = \lambda / \rho c$ – коэффициент температуропроводности.

В случае если радиус пятна нагрева на поверхности образца существенно больше толщины зоны лазерного воздействия, что соответствует результатам экспериментальных исследований, то при рассмотрении процессов распространения температурного поля в облучаемом веществе, можно ограничиться одномерным случаем уравнения теплопроводности [8]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho c} q(x, t), \quad (2)$$

где $q(x, t)$ – плотность поглощенного светового потока, связанная с параметрами лазерного излучения следующим соотношением:

$$q(x, t) = \frac{P}{S} = \frac{W}{S\tau}, \quad (3)$$

где $P = W/\tau$ – мощность лазерного излучения;

W – энергия в импульсе;

S – площадь пятна нагрева;

τ – длительность лазерного воздействия.

Для конкретизации задачи необходимо сформулировать условия однозначности, т.е. начальные и граничные условия.

В нашем случае предполагаем, что до начала процесса облучения температура во всех точках среды одинакова и равна температуре окружающей среды T_0 , т.е. начальное условие имеет вид:

$$T(x, t)|_{t=0} = T_0 = const. \quad (4)$$

С начала и в течение всего процесса обработки на поверхности облучаемого образца функционирует тепловой источник круглой формы с удельной мощностью q , причем подводимая источником мощность в этой области полностью расходуется на нагрев тела:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q. \quad (5)$$

Тогда решение нестационарного уравнения теплопроводности в одномерном случае при заданных условиях однозначности имеет вид:

$$T(x, t) = \frac{q}{c\rho} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n\pi x) \exp(-n^2 \pi^2 a t) \right]. \quad (6)$$

На основании полученного распределения температурного поля можно подобрать параметры лазерного излучения (длительность воздействия, энергия в импульсе, диаметр пучка, фокусное расстояние, время воздействия) для получения частиц золота максимального размера, что облегчит их последующее извлечение.

Разработанная на основе обобщенного закона теплопроводности математическая модель распределения температурного поля в облучаемом образце может быть успешно применена для численного исследования процессов лазерной агломерации ультрадисперсного золота и выбора наиболее рациональных режимов теплового воздействия.

Таким образом, наблюдаемые при лазерном воздействии изменения формы, структуры и состава исходного золотосодержащего дисперсного минерального сырья позволяют получить

относительно крупные частицы чистого золота, пригодные для извлечения обычными гравитационными способами [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Чантурия В.А., Гуляев Ю.В., Лунин В.Д. и др. Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов // ДАН. 1999. Т. 366. № 5. С. 680-683.
- 2 Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. // Монография под ред. академика Н.П. Юшкина, чл.-кор. РАН А.М. Асхабова, д-ра. геол.-минер. наук В.И. Ракинаю – СПб.: Наука, 2005. – 581 с.
- 3 Леоненко Н. А., А.П. Кузьменко, М.В. Петерсон, Н.А. Кузьменко. Лазерная агломерация ультрадисперсного золота из минеральных и техногенных ассоциаций высокоглинистых песков. // Записки горного института. СПб. 2007. Т171. С.113-116.
- 4 Моисеенко В.Г., Остапенко Н.С., Миронюк А.Ф.. Нетрадиционный подход к отработке техногенных золотосодержащих россыпей. // Горный журнал. 2006. – № 4. – С. 66-68.
- 5 Галустян Л.А. Технология извлечения коллоидного золота из производственных и сточных вод золотоизвлекающих фабрик. // Горный журнал. 2003. № 2. С. 61-62.
- 6 Леоненко Н.А., Гальцов А.А.Капустина В.Г., Швец Н.Л. Исследование фрактальных структур, образованных при высококонцентрированном энергетическом воздействии на природные минеральные объекты // Вестник АмГУ. - Благовещенск, - 2009. - Вып. 45. - С. 30-33.
- 7 Кузьменко А.П., Леоненко Н.А., Заводинский В.Г., Кузьменко Н.А., Петерсон М.В., Данильченко Д.Г. Лазерная агломерация ультрадисперсного золота из минеральных и техногенных ассоциаций и абляция нанокластеров диоксида циркония на поверхности кремния // Нанотехника. - 2007. - № 3. - С. 94-98.
- 8 Веселовский В.Б., Губин А.И. Математическое моделирование лазерного термического упрочнения без плавления поверхности // Металлургическая теплотехника. – 2008. – № 7. – С. 53-61.
- 9 Шевкун Е.Б., Кузьменко А.П., Леоненко Н.А. и др. Способ лазерного формообразования и обогащения благородными металлами минеральных ассоциаций. Патент РФ №2255995 от 04.12.03. Опубликовано 10.07.05 Бюл. № 19.

Леоненко Нина Александровна

Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, г. Хабаровск

Кандидат технических наук, с. н. с. Лаборатории проблем освоения рудных и нерудных месторождения открытым способом

Тел. (4212) 31-17-06

E-mail: leonenko@igd.khv.ru

Ванина Елена Александровна

Амурский государственный университет, г. Благовещенск

Доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой "Теоретическая и прикладная физика"

Тел. (4162) 394-508

E-mail: e.a.vanina@amursu.ru

Гальцов Александр Андреевич

Амурский государственный университет, г. Благовещенск

Аспирант кафедры "Теоретическая и прикладная физика"

E-mail: algaltsov@yandex.ru

Капустина Галина Григорьевна

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Преподаватель кафедры "Физика", аспирант ИГД ДВО РАН

g.kapustina@mail.ru

Швец Наталья Леонидовна

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Преподаватель кафедры "Физика", аспирант ИГД ДВО РАН

nat.leon66@mail.ru

А.А. КОШИН, Н.Ю. ШАКИРОВА

МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ШЛИФОВАНИЯ МЕТАЛЛО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Разработана математическая модель температурного поля в зоне шлифования металлополимерных композитов. В модели учтено влияние структурной неоднородности материала на его нагрев.

Ключевые слова: *структурно-неоднородный материал, шлифование, температурное поле.*

The mathematical model of temperature field in the metal-polymeric composite grinding region is developed. The model takes account of structure inhomogeneity influence on heating.

Key words: *heterogeneous material, grinding, temperature field.*

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время во многих отраслях машиностроения применяются композиционные материалы. Появившиеся в 30-е годы прошлого столетия, сегодня они применяются в качестве конструкционных в авиа- и ракетостроении, автомобилестроении и в других областях промышленности. Композиционные материалы обладают широким диапазоном физико-механических свойств, что позволило им успешно заменить традиционные металлы и сплавы в конструкциях многих изделий.

Уникальные свойства композиционных материалов объясняются особенностями их строения. Композит представляет собой структурно-неоднородный материал, состоящий из двух и более фаз и имеющий свойства отличные от свойств составляющих.

В работе объектом исследования является металлополимерный композит, представляющий собой полимерную матрицу армированную частицами твердого наполнителя. В качестве наполнителя выступают измельченные частицы сталей и их сплавов. Металлополимерные композиты один из наиболее распространенных видов композиционных материалов. Они широко применяются как в виде конструкционных материалов, так и в виде защитных покрытий, а так же в технологиях ремонта.

К металлополимерам, так же как и к традиционным сталям и сплавам, применяются все виды механической обработки: фрезерование, точение, сверление, шлифование и др. В большинстве случаев шлифование является финишной операцией в технологическом процессе обработки металлополимеров, в ходе которой получают окончательные размеры и качество обрабатываемой поверхности. Абразивная обработка является теплонапряженным процессом. Во время шлифования температура в зоне резания может достигать значений порядка 1000 градусов Цельсия. При такой температуре происходит расплавление полимерной матрицы, что приводит к разрушению поверхностных слоев материала. Поэтому моделирование температурного поля металлополимерного композита в процессе шлифования является актуальной задачей, позволяющей управлять процессом нагрева материала и не допускать его разрушения во время обработки.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработке математических моделей температурного поля в процессе шлифования посвящены многие работы. Однако область их применения ограничена однородными, изотропными материалами. Температурное поле структурно-неоднородного материала описывается нелинейным дифференциальным уравнением теплопроводности второго порядка, в котором теплопроводность и удельная теплоемкость материала являются функциями координат. На

границе раздела фаз композита должно выполняться условие идеального контакта, то есть ставиться граничное условие третьего рода.

При решении задачи численным методом, таким как метод конечных элементов, необходимо разбивать структурно-неоднородный материал сеткой, размеры ячеек которой малы по сравнению с размерами включений композита. Кроме того, для построения решения потребуется информация о характере расположения твердых частиц наполнителя в полимерной матрице. Таким образом, получившееся решение будет чрезвычайно трудоемким и обладать низкой точностью.

Для решения задачи теплопроводности в металлополимерном композите предлагается воспользоваться методикой, изложенной в работе Д.И. Бардзокаса и А.И. Зобнина [1]. При таком подходе композиционный материал рассматривается как сплошная среда с периодической структурой. Такая среда состоит из повторяющихся одинаковых элементов, которые называются ячейками периодичности. Нагрев металлополимера описывается уравнением математической физики с периодическими коэффициентами, представляющими собой физико-механические свойства композитов. Решение уравнения с периодическими коэффициентами основано на теории асимптотического осреднения. Основы этой теории созданы в работах Н.С. Бахвалова, Г.П. Панасенко [2]. Исходная задача для неоднородного композита заменяется на аналогичную задачу для однородной среды с постоянными (эффективными) коэффициентами. Решение ищется в виде двухмасштабного разложения в ряд по степени малого параметра (1):

$$T_\alpha(x) = T_0(x, y) + \alpha T_1(x, y) + \alpha^2 T_2(x, y) + \dots, \quad (1)$$

где y и x два масштаба координат, соответствующие микроскопическому (на уровне ячейки периодичности) и макроскопическому (на уровне материала в целом) описанию процесса нагрева металлополимерного композита; малый параметр α , по которому происходит разложение, является характерным размером представительного элемента. Значения эффективных характеристик находятся из решений специальных локальных задач. Таким образом, применяя метод асимптотического осреднения, можно представить уравнение физического поля в виде линейного дифференциального уравнения. А используя метод двухмасштабного разложения и свойства периодичности функции коэффициентов, удается описать действия поля с учетом локальной структуры материала.

Учитывая особенности кинематики процесса шлифования (соотношения размеров круга и заготовки, глубину резания), масштабные соотношения размеров источника тепла (шлифовального круга) и глубины поверхностных слоев детали, а так же изотропность материала на макроуровне, можно перейти от объемной к одномерной задаче теплопроводности. При сделанных допущениях рассматривается задача, когда на конце полубесконечного стержня в течение некоторого времени действует источник тепла. На рисунке 1 представлена расчетная схема к задаче о нагреве металлополимера, учитывающая принятую модель материала и сделанные допущения.

По принятой методике расчета температурного поля на схеме изображены две системы координат: глобальная (ось X), связанная с заготовкой и локальная (ось y), связанная с ячейкой периодичности. Рассматривается ячейка периодичности Y толщиной $2H$, составленная из однородных изотропных фаз Y_1 и Y_2 толщиной $2h_1$ и $2h_2$ соответственно, где $h_1 + h_2 = H$. Принимается, что на единицу измерения, характерную для данной задачи приходится $1/a$ ячеек периодичности. В таком случае, a – размер ячейки периодичности в метрах, локальная координата y и локальные функции будут являться безразмерными.

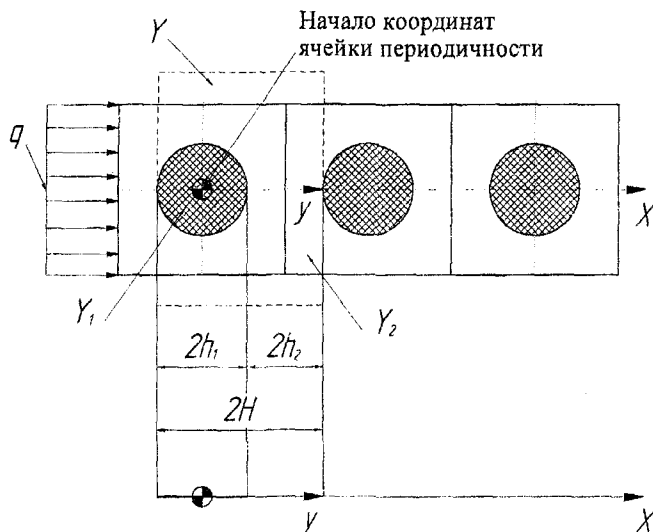


Рисунок 1 - Расчетная схема к задаче о нагреве металлополимера

Y – ячейка периодичности; Y_1 – частица твердого наполнителя; Y_2 – полимерная матрица; y – локальная координата; $2h_1$ – размер частицы наполнителя; $2h_2$ – размер полимерной фазы; $2H$ – размер ячейки периодичности; X – глобальная координата; q – интенсивность тепловыделения источника, Вт/м².

Математическая постановка задачи теплопроводности для процесса шлифования металлополимера имеет следующий вид:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (t > 0, 0 < x < \infty), \quad (2)$$

$$T(x, 0) = T^*, \quad (3)$$

$$q = \lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial x}, \quad (4)$$

$$T_m = T_n, \quad (5)$$

$$\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_n \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (6)$$

где c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг*С°); λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м*С°); T – температура, рассматриваемая как функция координат и времени, С°; t – время, с; x – текущая координата; q – интенсивность источника тепловыделения, (Вт/м²). Буквами на месте нижних индексов обозначается отношение параметра либо к материалу матрицы (T_m), либо к материалу наполнителя (T_n).

Формула (2) представляет собой уравнение теплопроводности для полубесконечного стержня, на конце которого находится постоянный источник тепла. Формулы (3) – (6) являются краевыми условиями задачи: температура в начальный момент времени равна T^* , на конце стержня действует постоянный поток тепла интенсивностью q . Последние два уравнения – условия идеального контакта на границе раздела фаз композита, заключающиеся в непрерывности температур и потока тепла на границе раздела. В дальнейших расчетах принимается, что материал матрицы и наполнителя является однородным. Физические характеристики каждой из фаз композита считаются постоянными.

В результате решения системы уравнений (1) – (6) получается следующее выражение, описывающее нагрев металлополимера в процессе шлифования:

$$T(x, y, t) = T^* + \frac{2q}{\sqrt{\langle \lambda \rangle \langle c \rangle \langle \rho \rangle}} \sqrt{t} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{\frac{4 \langle \lambda \rangle t}{\langle c \rangle \langle \rho \rangle}}} \right) - \alpha F_1 \frac{\frac{\langle \rho \rangle \langle c \rangle x^2}{4 \langle \lambda \rangle t}}{\sqrt{\pi \langle \lambda \rangle}} + \alpha^2 F_{11} \frac{\frac{\langle \rho \rangle \langle c \rangle x^2}{4 \langle \lambda \rangle t}}{\sqrt{\pi \langle \lambda \rangle^2 t}} \quad (7)$$

где $\langle \lambda \rangle$ – эффективный коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м*С°); $\langle c \rangle$ – эффективная удельная теплоемкость материала, Дж/(кг*С°); $\langle \rho \rangle$ – эффективная плотность материала, кг/м³; F_1 – локальная функция первого порядка, находится из решения уравнения (8); F_{11} – локальная функция второго порядка, находится из решения уравнения (9).

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \left(1 + \frac{\partial F_1}{\partial y} \right) \right] = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial F_{11}}{\partial y} \right) = \left(\frac{c}{\langle c \rangle} \langle \lambda \rangle - \left(\lambda \left[1 + \frac{\partial}{\partial y} F_1 \right] + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda F_1) \right) \right). \quad (9)$$

Первые два слагаемых уравнения (7) представляют собой классическое решение задачи теплопроводности для однородного материала с граничным условием второго рода [3], [4]. Далее следуют локальные поправки первого и второго порядка, учитывающие неоднородность структуры материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По полученной математической модели (7) сделан расчет температурного поля в процессе шлифования металлополимеров. Расчет выполнен для материала со средними физико-

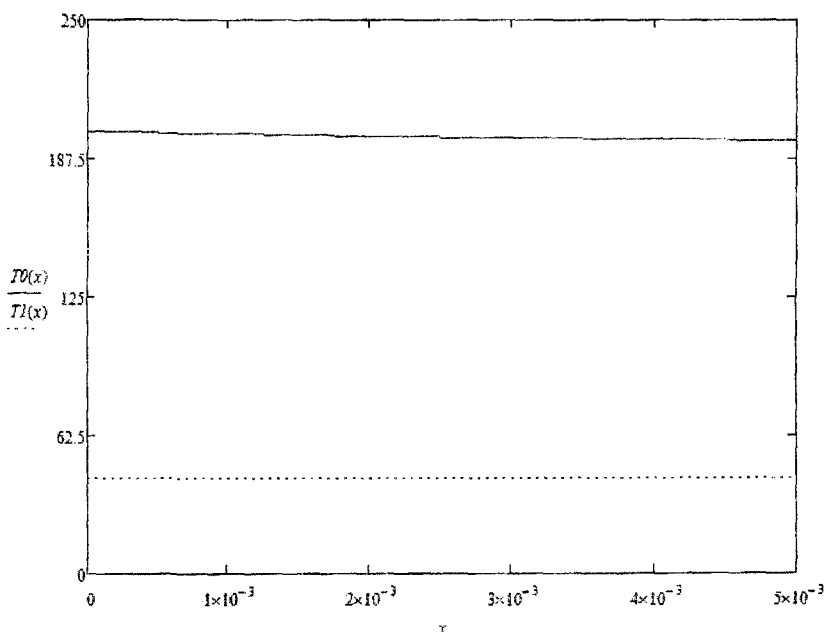


Рисунок 2 – Графики зависимости температуры нагрева металлополимера от глубины ее проникновения

механическими характеристиками (без учета локальных процессов, протекающих в материале на уровне составляющих его структуры) и с эффективными коэффициентами, учитывающими локальные поправки на температуру. Это позволяет оценить разницу между средними и эффективными значениями характеристик материала. На рисунке 2 изображены графики зависимости температуры от глубины ее проникновения в материал за время контакта шлифовального круга с деталью. График $T0(x)$ построен с эффективными значениями теплофизических характеристик с учетом локальных поправок, $T1(x)$ – с усредненными по объему материала значениями теплофизических характеристик.

Из рисунка 2 видно, что математическая модель температурного поля металлополимера без учета особенностей строения материала, дает значительно заниженные значения и не отражает реального распределения температуры в поверхностном слое металлополимерного композита. Оптимальной моделью, описывающей с достаточной точностью нагрев композита, является модель с эффективными значениями теплофизических характеристик и с локальными поправками до второго порядка включительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бардзокас Д.И., Зобнин А.И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры. М.: Едиториал, УРСС, 2003. – 376 с.
- 2 Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. Математические задачи механики композиционных материалов. М.: Наука, 1984. – 352 с.
- 3 Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: «Машиностроение», 1974. – 280 с.
- 4 Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Изд-во «Высшая школа», 1967. – 599 с.

Кошин Анатолий Александрович

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»
 Тел. (351) 233-27-35
 E-mail: kaa@susu.ac.ru

Шакирова Наталья Юрьевна

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск
 Аспирант кафедры «Технология машиностроения»
 Тел. 89085787709
 E-mail: natasha_dargel@mail.ru

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 621.893.099.6 : 620.1

Е.В. АНЦИФОРОВА, Е.В. ПАХОЛКИН

ТРИБОМОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫМИ СОСТАВАМИ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

В работе рассматриваются и анализируются существующие в современной трибологии и смежных областях знаний гипотезы о механизмах действия ремонтно-восстановительных составов и методы трибомониторинга процессов модифицирования рабочих поверхностей узлов трения ремонтно-восстановительными составами.

Ключевые слова: аналитический обзор, гипотезы, методы трибомониторинга, модифицированный слой, ремонтно-восстановительные составы, нанотрибология

The paper examines and analyzes existing in modern tribology and related fields of study hypotheses about the mechanisms of repair-and-renewal compositions and methods tribomonitoring processes modifying the working surfaces of friction units by repair-and-renewal.

Keywords: analytical review, hypothesis, methods of tribological monitoring, modified layer, repair-and-renewal compositions, nanotribology

ЦЕЛЬ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОБЗОРА

Целью работы является рассмотрение и анализ существующих в современной трибологии и смежных областях знаний гипотез о механизмах действия ремонтно-восстановительных составов (РВС), а также анализ методов трибомониторинга, пригодных для исследования процессов модифицирования рабочих поверхностей деталей узлов трения с применением РВС.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ГИПОТЕЗЫ О МЕХАНИЗМАХ ДЕЙСТВИЯ РВС

Описание гипотез о механизмах действия РВС выполнено с использованием источников [1-8], при этом в настоящей работе не рассматриваются мнения, отрицающие положительный эффект применения РВС.

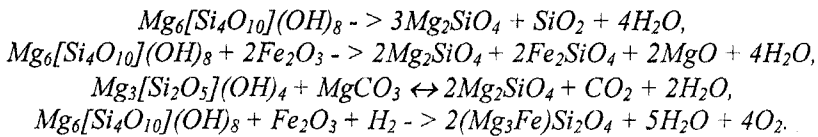
РВС применяются в качестве добавки к смазочным материалам, а их основным компонентом, обеспечивающим антифрикционные и восстановительные свойства, являются мелкодисперсные частицы природных минералов. Наиболее часто применяется минерал серпентина $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ [1]. При добавлении РВС к смазочному материалу происходит модифицирование трущихся поверхностей. При этом значительно улучшается микрогеометрия поверхностей и на них образуется защитный неметаллический слой с особыми физико-механическими свойствами. В литературе имеются многочисленные факты экспериментального доказательства положительного воздействия РВС на различные трибосопряжения. Однако в настоящее время отсутствует теория, объясняющая сущность совокупности явлений, протекающих в зоне трения при наличии мелкодисперсных частиц минералов. В тоже время существует множество гипотез о механизмах действия РВС, некоторые из них приведены ниже.

Автор работы [1] описывает следующий многостадийный механизм формирования защитного слоя на поверхностях трения.

1. Твердые частицы, имеющиеся в РВС (силикаты, оливины, пироксены и др.), имеющие твердость закаленной стали, шаржируют менее твердые поверхности трения. Это сопровождается ухудшением триботехнических характеристик, повышением температуры и значительным абразивным изнашиванием сопряженной детали, главным образом в период приработки.

2. Более мягкие частицы серпентина постепенно заполняют пространство между частицами SiO_2 , оливинов и пироксенов, где сильно уплотняются и теряют свою подвижность в смазочной композиции. Формирующаяся гетерогенная структура (в мягкой основе присутствуют более твердые частицы несущей фазы) напоминает структуру антифрикционных сплавов. Она способна функционировать с обеспечением удовлетворительных триботехнических и противоизносных характеристик.

3. При ужесточении условий трения и неизбежных при этом локальных вспышках температуры на поверхности наиболее нагруженных контактных площадок происходит разложение серпентина с образованием более твердых фаз и освобождением воды:



Новый гетерогенный конгломерат не сразу затвердевает, а некоторое время находится в псевдожидком состоянии, поглощая в своем объеме новые частицы РВС, доставляемые к активированному участку смазочным материалом. В результате происходит наращивание защитного керамического слоя на участке с повышенной интенсивностью изнашивания.

4. Участвуя в реакциях гидратации с образованием кристаллогидратов, освобождаясь вода способствует формированию и затвердеванию новой гетерогенной среды, т. е. образованию тонкого металлокерамического слоя.

5. В зависимости от условий работы трибосопряжений в различных машинах и механизмах металлокерамический слой может образоваться на большей части поверхности трения или даже покрыть ее полностью. В ряде случаев можно наблюдать условия безаварийной и почти безыносной эксплуатации узлов трения [1].

Похожая гипотеза о механизме формирования защитного слоя приведена также в [2]. Как пишут авторы, высокие температуры, генерируемые в зоне локальных контактов поверхностей, способны создавать условия для протекания окислительных, химических, электромагнитных явлений, которые при определенных граничных режимах работы механизма образуют на поверхностях деталей защитные противоизносные слои [2].

При попадании частиц РВС в зону трения, защитный слой формируется при протекании следующих процессов:

- 1) разрушение граничного слоя смазки;
- 2) разрушение пиков шероховатостей, упругопластическое деформирование, измельчение частиц РВС и, как следствие, выделение тепловой энергии, приводящее к повышению температуры в зоне контакта (до 400 ... 1100 °С);
- 3) смещение фаз образований (слоев) на поверхности тела (стали) с возникновением электрических и магнитных полей;
- 4) механическое воздействие на частицу РВС – разрыв связей Si-O-Si; Si-O-OH-металл; Si-O-OH и др., образование в поверхностных и подповерхностных слоях контактирующих материалов продуктов химических реакций;
- 5) появление текучести металла, образование в надповерхностном, поверхностном и подповерхностном слоях зон для протекания химической реакции замещения с участием соединений Fe основного металла и химически активных соединений РВС, появление первых зерен защитного слоя;

6) очистка зон контакта от продуктов предшествующего износа, уплотнение первичных зерен защитного слоя в неровностях шероховатостей, образование сплошного защитного слоя;

7) нагрузочное упрочнение и выравнивание механических свойств защитного слоя [2].

В публикации [3] выдвинута гипотеза, что один из механизмов действия РВС аналогичен механизму действия твердых смазочных материалов.

Некоторые твердые тела могут производить смазочное действие, организуя и поддерживая режим трения при граничной смазке. Твердые смазочные материалы имеют высокую прочность с основой и низкое сопротивление на сдвиг. К твердым смазочным материалам относят графит, дисульфид молибдена (MoS_2), нитрид бора (BN), мягкие металлы (In, Ag, Al, Pb, Sn, Cu и др.)

К группе веществ со слоисто-решетчатой структурой, обладающих свойствами, необходимыми для смазки металлических поверхностей, авторы относят также минерал серпентин, относящийся к слоистым силикатам. Специфическое строение слоистых силикатов – наличие пакетов, состоящих из гексагональных сеток-слоев, связанных друг с другом очень слабыми связями, определяет и свойства этих минералов: низкую твердость, весьма совершенную спайность и расщепляемость на тонкие пластинки. В связи с этим авторы статьи [3] предполагают, что один из механизмов действия противоизносного РВС аналогичен механизму действия твердых смазочных материалов (графита, дисульфида молибдена и др.).

Во многих работах высказывается гипотеза о том, что добавленный в смазку РВС обеспечивает открытый Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским эффект избирательного переноса в зонах трения [3 – 6]. Трущуюся пару можно рассматривать как термодинамическую систему, где возможен обмен поверхностями трения с внешней средой (смазкой) энергией и веществом и, следовательно, возможно образование новых структур на основе самоорганизующихся процессов. Установлено, что эти новые структуры могут обеспечивать безызносную работу узла трения путем образования защитной (сервовитной) пленки на поверхности трущихся деталей [3].

Основное преимущество РВС состоит в способности создавать в зонах трения динамические защитные пленки из тонкодисперсных продуктов изнашивания и самого геомодификатора в виде квазисжиженного слоя или сервовитной пленки, образующейся в результате избирательного переноса. При этом в процессе приработки узла происходит равномерное упрочнение поверхности трения, что вызывает не только многократное снижение скорости изнашивания, но и существенное уменьшение коэффициента трения и, следовательно, механических потерь [4].

Кроме описанных основных гипотез приводятся также предположения о том, что благодаря химическому строению минерала серпентина при использовании РВС подавляются процессы водородного изнашивания и охрупчивания металла [7, 8].

Таким образом, даже краткий анализ публикаций по проблеме применения РВС позволяет констатировать существование множества гипотез и отсутствие единой теории, объясняющей сущность явлений, протекающих в зоне трения при наличии мелкодисперсных частиц минералов. В тоже время авторами всех рассмотренных публикаций признается тот факт, что при наличии РВС в смазочном материале происходит модифицирование трущихся поверхностей, и на них образуется защитный неметаллический слой, благодаря которому существенно улучшаются триботехнические характеристики узлов трения: наблюдается увеличение износостойкости трибосопряжений, снижение шероховатости поверхностей контактирующих тел, уменьшение коэффициента трения, что в итоге приводит к снижению потерь энергии или топлива, увеличению ресурса технических объектов, снижению затрат на ремонт и техническое обслуживание, снижению шума и вибрации. При этом отсутствие единой теории, объясняющей механизм действия РВС, приводит и к отсутствию научно обоснованных методик использования данных технологий, что существенно сдерживает их внедрение в промышленность. Можно сделать вывод об актуальности разработки методов и средств мониторинга процессов в зоне трения, связанных с действием РВС.

МЕТОДЫ ТРИБОМОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ РВС

Для исследования процессов модифицирования рабочих поверхностей узлов трения РВС можно использовать применяемые в настоящее время в нанотрибологии такие методы, как сканирующая зондовая микроскопия, электронная микроскопия, спектроскопические методы, рентгеновские методы с использованием синхротронного излучения [9].

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) – один из мощных современных методов исследования морфологии и локальных свойств (механических, электрических, магнитных и др.) поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением. В сканирующих зондовых микроскопах исследование микрорельефа поверхности и ее локальных свойств проводится с помощью специальным образом приготовленных зондов в виде игл. Рабочая часть таких зондов (острие) имеет размеры порядка десяти нанометров. Характерное расстояние между зондом и поверхностью образцов в зондовых микроскопах по порядку величин составляет 0,1 – 10 нм. В основе работы зондовых микроскопов лежат различные типы взаимодействия зонда с поверхностью. Так, работа туннельного микроскопа основана на явлении протекания туннельного тока между металлической иглой и проводящим образцом. Различные типы силового взаимодействия лежат в основе работы атомно-силового, магнитно-силового и электросилового микроскопов [10].

Электронная микроскопия – совокупность электронно-зондовых методов исследования микроструктуры твердых тел, их локального состава и микрополей с помощью электронных микроскопов – приборов, в которых для получения увеличенных изображений используют электронный пучок. Различают два главных направления электронной микроскопии: просвечивающую и растровую, основанных на использовании соответствующих типов электронных микроскопов [11].

В просвечивающих электронных микроскопах изучаются образцы в виде тонких плёнок, фольги толщиной от 1 нм до 10 мкм [12]. Таким образом, для изучения модифицированных рабочих поверхностей узлов трения данное направление электронной микроскопии не подходит, а для решения рассматриваемой задачи можно использовать растровую электронную микроскопию.

В растровых электронных микроскопах электронный луч, сжатый магнитными линзами в тонкий (1-10 нм) зонд, сканирует поверхность образца, формируя на ней растр из нескольких тысяч параллельных линий. Возникающие при электронной бомбардировке поверхности вторичные излучения регистрируются различными детекторами и преобразуются в видеосигналы, модулирующие электронный луч в электронно-лучевой трубке. Развертки лучей в колонне растрового электронного микроскопа и в электронно-лучевой трубке синхронны, поэтому на экране электронно-лучевой трубки появляется изображение, представляющее собой картину распределения интенсивности одного из вторичных излучений по сканируемой площади объекта [11].

С помощью спектроскопических методов получают сведения о химическом составе, структуре поверхности, степени окисления поверхностных молекул и химической активности поверхности или молекул и др., анализируя различные спектры электромагнитного излучения. Глубина анализа обычно определяется тем сортом частиц, которые используются в конкретном эксперименте, и меняется от десятых долей нанометра до 10^3 нм [13].

Для исследования веществ в нанокристаллическом состоянии используются различные методы спектроскопии: радиоспектроскопия, инфракрасная спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, электронная оже-спектроскопия и др. [7,9,13].

Рентгеновские методы с использованием синхротронного излучения относятся к дифракционным методам исследования структуры вещества, основаны на изучении углового распределения интенсивности рассеяния исследуемым веществом излучения. Первичный чаще всего монохроматический, пучок направляют на исследуемый объект и анализируют картину рассеяния. Рассеянное излучение регистрируется фотографически или с помощью

счетчиков. Поскольку длина волны излучения составляет обычно не более 0,2 нм, т. е. соизмерима с расстояниями между атомами в веществе (0,1-0,4 нм), то рассеяние падающей волны представляет собой дифракцию на атомах. По дифракционной картине можно восстановить атомную структуру вещества [14].

Несмотря на то, что данные методы широко применяются для исследований в нанотехнологиях, для решения практических задач трибомониторинга процессов модифицирования поверхностей трения эти методы являются мало пригодными. Для их реализации необходимо дорогое оборудование, требуются остановка и разборка узла трения, кроме того, данные методы не являются адаптированными для широкого внедрения в промышленность.

Среди методов мониторинга действия РВС можно выделить лабораторные испытания на различных машинах трения с оценкой триботехнических характеристик пар трения до и после приработки с РВС. Как показывает анализ публикаций, большинство исследований процессов действия РВС в настоящее время проводится с использованием этих методов. Разными исследователями измеряются различные триботехнические характеристики для мониторинга действия РВС. В работах [3, 4, 6, 15, 17, 18] изучалось изменение коэффициента трения в зависимости от времени, нагрузки или давления. В [3, 4, 17, 18] измерялся линейный износ или износ по массе. Также измерялись следующие триботехнические параметры: давление задира [4], время работы без смазки (определялось по времени работы узла при наличии модифицированного слоя до задира) [4], момент трения в зависимости от времени приработки [16], температура в зоне трения [17]. Также совместно с триботехническими характеристиками часто исследовались параметры шероховатости поверхности трения до и после приработки с РВС [16, 17]. Для лабораторных испытаний использовались различные машины трения, например, МИ-1, СМЦ-2, МТУ-01, 77 МТ-1.

Также среди методов мониторинга процессов действия РВС можно выделить стендовые испытания РВС в различных трибосопряжениях. Из анализа публикаций видно, что чаще всего стендовые испытания проводятся с целью исследования влияния смазочных композиций с РВС на основные показатели двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [4, 17, 19]. При этом оценивается влияние РВС на такие показатели двигателей, как расход топлива, износ деталей двигателя, угар моторного масла, номинальная мощность, максимальный крутящий момент, компрессия и др.

Несмотря на то, что методы лабораторных испытаний на машинах трения и стендовых испытаний широко распространены, они довольно трудоемки, так как для комплексной оценки триботехнических свойств РВС необходимо измерить множество различных параметров, кроме того, для реализации этих методов часто требуется дорогое оборудование.

Для мониторинга процессов, протекающих в зоне трения при наличии мелкодисперсных частиц минералов можно использовать также электрические методы трибодиагностики. Их сущность заключается в оценке состояния объекта по значениям электрических диагностических параметров, характеризующих сложные процессы, протекающие в зонах трения. При реализации электрических методов исследуемый объект непосредственно подключается к электронному средству диагностирования, определяющему требуемые в соответствии с решаемой задачей диагностические параметры – характеристики флуктуирующей ЭДС (генераторные методы) или электрических параметров – сопротивления, проводимости, емкости (электропараметрические методы).

К достоинствам электрических методов относят универсальность (решение задач трибометрии, трибодиагностики, испытаний, контроля и прогнозирования), безынерционность по отношению к протекающим во фрикционном контакте процессам, простоту реализации (электрический сигнал о состоянии объекта контроля поступает непосредственно из зон трения его деталей, легко преобразуется, обрабатывается и оценивается). Важнейшим достоинством также является высокая чувствительность электрических методов при оценке качества рабочих поверхностей трибосопряжений. Наконец, сравнительная простота технических средств, определяющая их невысокую стоимость, является существенным преимуществом по сравнению с другими методами решения проблемы.

Подробный обзор и анализ методов электрического контроля трибосопряжений дан в работе [20]. Электрические методы являются эффективными при решении задач обнаружения и развития дефектов [21], изменение технического состояния объекта, появление локальных дефектов, увеличение общего износа поверхностей трения приводит к изменениям в характере протекания рассматриваемых явлений. Так как процессы ремонтного восстановления деталей трибосопряжений, имея обратную направленность, также связаны с изменением качества трущихся поверхностей, можно говорить о наличии предпосылок к использованию электрических методов для мониторинга РВС-технологий. Эффективность использования данных методов для решения поставленной задачи подтверждена экспериментальными исследованиями [22].

Электрические методы трибомониторинга менее трудоемкие по сравнению с другими методами, рассмотренными выше. Как уже отмечалось, технические средства, необходимые для реализации данных методов, имеют сравнительно невысокую стоимость. При этом важным преимуществом данных методов является то, что трибомониторинг можно осуществлять в процессе работы трибосопряжения. Наконец, электрический метод трибомониторинга процессов модифицирования рабочих поверхностей узлов трения может быть адаптирован для широкого внедрения в промышленность.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, номер конкурса НК-494П, шифр проекта П289.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кузьмин, В. Н. Работоспособность трибосопряжений при использовании смазочных композиций (СК) с добавками – минеральными геомодификатора трения / В. Н. Кузьмин // Трение, износ, смазка. – 2009. – Т. 12. - № 41.
- 2 Теплотехнические условия защиты деталей от износа при введении в зону трения серпентином-магниевого состава / П. М. Быков, Г. И. Шаров (Череповецкий государственный университет) // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2007. - № 4. - С. 105-109. Рус.
- 3 Некоторые триботехнические исследования противоизносных антифрикционных ремонтно-восстановительных составов / В. Н. Дураджи, С. П. Хазов // Производство и ремонт машин: Сборник материалов Международной научно-технической конференции, Ставрополь, 28 февр. – 6 марта. 2005. Ставрополь.: Изд-во Ст.-ГАУ «АРГУС». 2005, с. 37-44.
- 4 Триботехнические характеристики модификаторов трения / Б. Н. Перминов // Повышение надежности судового оборудования: Сборник научных трудов. Мор. гос. ун-т. Владивосток: Изд-во Мор. гос. ун-та. 2002. – С. 173-181.
- 5 Лавров, Ю. Г. Минеральные добавки в смазочное масло / Ю. Г. Лавров // Двигателестроение. – 2003. - №2. – С. 46-48.
- 6 Поляков, С. А. Проблемы динамической адаптации трибосистем к условиям эксплуатации на основе наноструктурной самоорганизации / С. А. Поляков // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. - №5. – С. 360.
- 7 Балабанов, В. И. Нанотехнологии. Наука будущего [Текст] / В. И. Балабанов. – М.: Эксмо, 2009. – 256 с.: ил. – (Открытия, которые потрясли мир).
- 8 Силикатно-керамическая композиция «Форсан» / Н. Н. Колесников, Г. К. Лобачева // Альманах-2004. Волгоградское отделение МААНОИ. Волгоград: Изд-во ВолГУ. 2004, с. 410-423.
- 9 Елисеев, А. А. Функциональные наноматериалы [Текст] : учеб. пособие / А. А. Елисеев, А. В. Лукашин ; под ред. Ю. Д. Третьякова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 456 с.
- 10 Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии [Текст] : учеб. пособие / В. Л. Миронов. – Н. Новгород : РАН, Институт физики микроструктур, 2004. – 114 с. : ил.
- 11 Электронная микроскопия – Химическая энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/5313.html>
- 12 Электронная микроскопия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/126/079.htm>
- 13 Борисов, С.Ф. Межфазная граница «газ – твердое тело»: структура, модели, методы исследования [Текст]: учеб. пособие / С. Ф. Борисов, О. Е. Герасимова. – Екатеринбург : Изд-во УрГУ, 2006.
- 14 Дифракционные методы – Химическая энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/1430.html>

- 15 Исследование трибологических параметров подшипников скольжения при использовании жидкой смазки с РВС / В. А. Ильных // Трибофатика: Сборник докладов 5 Международного симпозиума, Иркутск, 3-7 окт. 2005. Т. 2. Иркутск.: Изд-во ИрГУПС, 2005, С. 253-254.
- 16 Влияние геомодификаторов трения на приработку ответственных трибосопряжений / В.М. Петров, С.Г. Чулкин, П. Б. Аратский // Трение, износ, смазка. – 2001. – Т. 3. - № 3. – С. 78-93.
- 17 Некоторые результаты исследований влияния смазочных композиций с добавками геомодификаторов трения на работоспособность трибосопряжений в лабораторных и натуральных условиях / В.М. Петров // Трение, износ, смазка. – 2004. - №22.
- 18 Триботехнические испытания препарата «ФОРСАН» / С.Г. Чулкин, В.М. Петров // Трение, износ, смазка. – 2001. - №9.
- 19 Расчетно-экспериментальное исследование влияния антифрикционных восстанавливающих добавок в масло на показатели механических потерь и износа сопряжений трения поршневого двигателя / Э. М. Мохнаткин, А. Ю. Шабанов, А. Б. Зайцев, А. В. Тимофеев // 2 Международная научно-практическая конференция "Теория и практика повышения качества и рационального использования масел, смазочных материалов и технических жидкостей", Санкт-Петербург, 5-8 июня, 2007: Сборник трудов конференции. СПб: Акад. прикл. исслед. – 2007. - С. 90-93, 2 ил. Рус.
- 20 Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст]. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
- 21 Подмастерьев, К.В. Электрический метод и средства поиска локальных дефектов опор качения [Текст] / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин // Дефектоскопия. – 1998. – №8.
- 22 Пахолкин, Е.В. Мониторинг восстановительных свойств смазочных материалов с ремонтно-восстановительными составами / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // Известия ОрелГТУ. - Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2008. – № 4. – С. 69-74.

Анцифорова Елена Владимировна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 419876
E-mail: ele-anciforova@yandex.ru

Пахолкин Евгений Васильевич

Орловский Государственный Технический Университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация"
Тел. (4862) 419876
E-mail: Eugene_P@bk.ru

УДК 371.261

А.В. КИРИЧЕК, А.В. МОРОЗОВА

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Рассматривается опыт разработки и внедрения в деятельность Технологического института Орловского государственного технического университета многоуровневой практики выбора оптимальной сферы профессиональной деятельности молодых специалистов на основе комплексной многоуровневой оценки качества его подготовки.

Ключевые слова: компетенция, метод анализа иерархий, приоритетная сфера профессиональной деятельности.

Experience of development and introduction in activity of the Institute of technology of the Oryol state technical university of multilevel practice of a choice of optimum sphere of professional work of young experts is considered on the basis of a complex multilevel estimation of quality of his preparation.

Key words: the competence, a method of the analysis of hierarchies, priority sphere of professional work.

Модернизация системы кадрового обеспечения инновационной экономики требует концептуального пересмотра системы требований, предъявляемых к социально-профессиональным характеристикам специалистов, разработке содержания и научно-методического обеспечения процессов системы менеджмента качества образовательных учреждений, обеспечивающих формирование заданной структуры компетенций молодых специалистов, а также действующих структурных моделей организации социально-профессионального пространства учреждений, реализующих систему подготовки кадров для производственной сферы регионов.

В этой связи, по-нашему мнению, весьма актуальной становится проблема выбора параметров для количественного оценивания качества специалиста, разработки компетентностных моделей специалистов, имеющих шкалированную уровневую структуру, а также методики сопоставления уровневых параметров молодых специалистов, выпускаемых учреждениями системы профессионального образования, и «идеальных работников» как базы аналитического сравнения, используемых в таких моделях.

Для этого, во-первых, необходимо уметь количественно оценить качество специалиста в данный момент времени. Во-вторых, необходимо уметь сравнивать качество специалистов, характеризуемых совокупностью многих параметров. В-третьих, необходимо учесть, что качество специалиста, как объект исследования, характеризуется как количественными, так и качественными параметрами, и необходимы методы, позволяющие привести их к единому целому. Все эти разнообразные задачи приводят к выводу о том, что для достижения поставленной цели необходимо использовать современные достижения теории и практики оценки качества различных объектов, разработанные в квалиметрии, а также методы экспертного оценивания.

Проведенный анализ теоретико-методологических подходов к формированию моделей компетенций специалистов позволяют выделить два наиболее актуальных варианта. В одной из них (американской) [2] сделан акцент на оценки компетенций специалиста в процессе его профессиональной деятельности при сравнении результатов его работы с результатами «наилучшего исполнителя». Другая модель (европейская) [4] имеет в своем фокусе систему компетенций, формируемую в процессе получения образования определенного профиля (как профессионального, так и дополнительного), и в своей основе опирающуюся на европейский стандарт инженерно-технического образования.

В этой связи, по-нашему мнению, система компетенций «идеального исполнителя», работающего на конкретной должности, которая формируется как обобщенная модель специалиста, востребованного на рынке труда, и индивидуальная система компетенций молодого специалиста-выпускника вуза, которая формируется в рамках образовательной среды, оказывают суперпозиционное воздействие на формирование структуры и оптимизацию выбора потенциальной сферы профессиональной деятельности молодых специалистов. Поэтому целесообразно рассматривать иерархическую структуру социально-профессиональной компетентности молодого специалиста, применяя для ее исследования метод анализа иерархий (МАИ).

В проводимых нами исследованиях для анализа составляющих социально-профессиональной компетентности выпускников системы профессионального образования технического профиля использовалась методика экспертного опроса и расчета приоритетов ресурсного потенциала. Метод позволяет не только рассчитывать приоритеты (весовые коэффициенты) основных составляющих (сфер) потенциального поля профессиональной деятельности выпускников, но и оценивать степень влияния каждого компонента ресурсного потенциала, а также степень согласованности суждений каждого эксперта и их совокупности в целом, что минимизирует ошибки и повышает надежность найденных результатов.

В исследуемой проблеме цель/фокус иерархии определена (социально-профессиональная компетентность молодого специалиста технического профиля как его индивидуальная характеристика). Альтернативами являются приоритетные сферы деятельно-

сти (ПСД) выпускников системы профессионального образования. Для выпускников системы профессионального образования технического профиля (специальность 1512001 «Технология машиностроения») нами предлагается структура иерархии, представленная на рисунке 1.

Система составляющих ресурсного потенциала содержит шесть подсистем компетенций «идеального исполнителя», которые составляют основу американской модели компетенций технических специалистов [2]. Они также имеют свои подсистемы. Всего ресурсный потенциал компетенций «идеального исполнителя» формируют десять компетенций специалистов (Ориентация на достижение, Воздействие и Оказание влияния, Концептуальное мышление, Аналитическое мышление, Командная работа и сотрудничество, Экспертиза, Ориентация на обслуживание клиентов, Поиск информации, Самоконтроль, Уверенность в себе). Таким образом, система компетенций «идеального исполнителя» технического профиля формирует второй уровень иерархии.

Все перечисленные компетенции специалиста формируются в процессе его взаимодействия с образовательной средой вуза. Поэтому третий уровень иерархии целесообразно представить структурой компетенций, используемой в европейской системе оценки качества инженерно-технического образования [4]. Она состоит из восьми областей знаний (Познавательные, Творческие, Социально-психологические, Знания и понимание, Инженерный анализ, Инженерное проектирование, Инженерная практика, Исследования). Эти области представляют собой ресурсный потенциал подсистемы образовательных компетенций в анализируемой иерархии. Эта система компетенций суперпозиционно взаимодействует с ресурсным потенциалом системы компетенций «идеального исполнителя», оказывая влияние на выбор такой сферы профессиональной деятельности специалиста, которая позволит ему оптимально как использовать свои возможности, так и быть полезным для развития производственной фирмы. Такой выбор определяет «приоритетную сферу» профессиональной деятельности специалиста (ПСД) и носит потенциальный характер (т.е. специалист может ее выбрать с учетом рекомендаций социально-маркетингового отдела вуза, а может и проигнорировать такие рекомендации)..

Наконец, четвертый, заключительный уровень иерархии формируется из составляющих ПСД, которые для выпускников СПО и ВПО будет различен. Так, для молодых специалистов, закончивших профессиональный колледж или факультет СПО университетского комплекса система альтернатив потенциальной сферы профессиональной деятельности может быть представлена следующими компонентами:

A1 – работа по специальности на предприятии с высоким уровнем технического оснащения и технологической культуры производства;

B1 – работа по специальности на предприятии со средним и низким уровнем технического оснащения и технологической культуры производства;

C1 – работа не по специальности (смена специальности и получение другой специальности среднего профессионального образования или приобретение рабочей профессии);

D1 – дальнейшее обучение в вузе при смене профиля специальности, по которой уже получено среднее профессиональное образование;

F1 – обучение в вузе с сохранением профиля специальности, по которой уже получено среднее профессиональное образование.

Для молодых специалистов, получивших степень бакалавра после окончания технического университета система альтернатив потенциальной сферы профессиональной деятельности может быть несколько иной, представленной следующими компонентами:

A2 – работа по специальности на предприятии с высоким уровнем технического оснащения и технологической культуры производства;

B2 – работа по специальности на предприятии со средним и низким уровнем технического оснащения и технологической культуры производства;

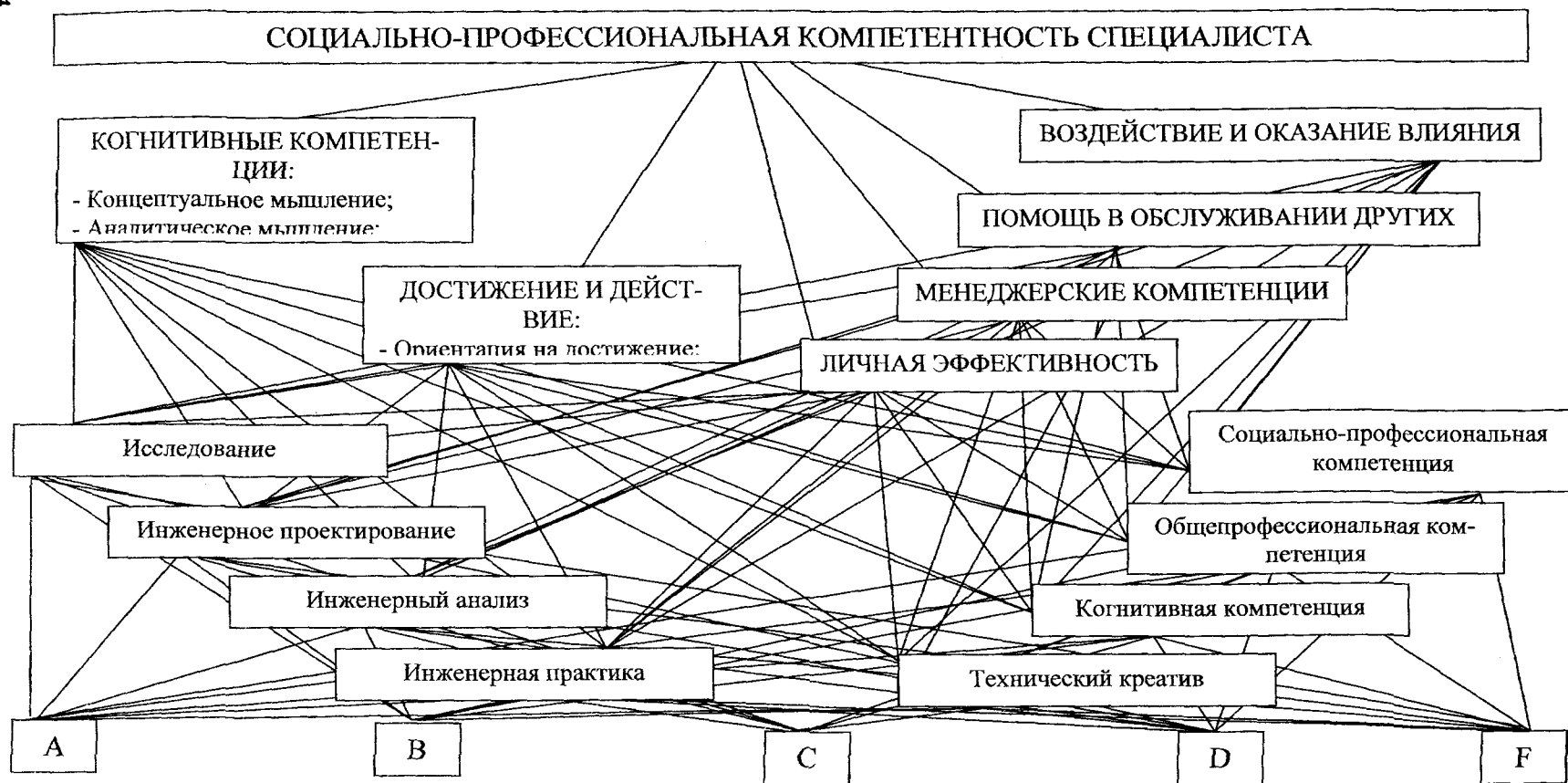


Рисунок 1 – Иерархия социально-профессиональной компетентности молодых специалистов, выпускников системы профессионального образования университетского комплекса (специальность 151001 «Технология машиностроения»)

C2 – работа не по специальности (смена специальности и получение другой специальности высшего или среднего профессионального образования или приобретение рабочей профессии);

D2 – дальнейшее обучение в магистратуре вуза при смене профиля специальности, по которой уже получена степень бакалавра;

F2 – обучение в магистратуре вуза с сохранением профиля специальности, по которой уже получена степень бакалавра.

Для молодых специалистов, закончивших магистратуру или аспирантуру технического вуза система альтернатив потенциальной сферы профессиональной деятельности совсем иная:

A3 – работа по специальности на предприятии с высоким уровнем технического оснащения и технологической культуры производства;

B3 – работа по специальности на предприятии со средним и низким уровнем технического оснащения и технологической культуры производства;

C3 – работа не по специальности (смена специальности и получение другой специальности среднего профессионального образования или приобретение рабочей профессии);

D3 – дальнейшее обучение в вузе при смене профиля специальности, по которой уже получено среднее профессиональное образование;

F3 – обучение в вузе с сохранением профиля специальности, по которой уже получено среднее профессиональное образование.

Кроме того, при необходимости данную структуру иерархии можно дополнить пятым уровнем, на котором можно реализовать задачу выбора приоритетной специализации выпускника (работа на определенной должности) системы профессионального образования с учетом влияния всей совокупности ресурсного потенциала его социально-профессиональных компетенций.

В качестве примера, рассмотрим следующие весовые соотношения в иерархии, характеризующие конкретного выпускника, получившего степень бакалавра в области техники и представленную на рисунках 2-4.

Проведенная экспертными группами на материале данного примера работа показывает, что в ходе профессиональной деятельности инженерно-технического профиля приоритетом пользуются КОГНИТИВНАЯ КОМПЕТЕНЦИЯ (вес 0,389) и КОМПЕТЕНЦИЯ ДОСТИЖЕНИЕ И ДЕЙСТВИЕ (вес 0,257). Наименее значимым является КОМПЕТЕНЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЕ И ОКАЗАНИЕ ВЛИЯНИЯ (вес 0,042).

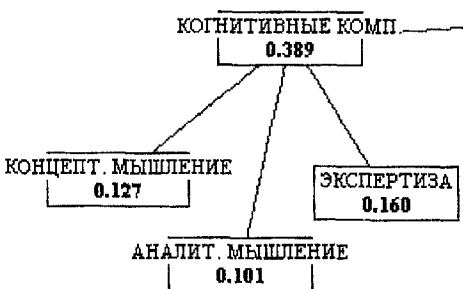


Рисунок 2 – Фрагмент иерархии: весовые соотношения в подсистеме Когнитивных компетенций специалиста технического профиля



Рисунок 3 – Фрагмент иерархии: весовые соотношения в подсистеме компетенций Достижение и действие специалиста технического профиля

Пусть в качестве примера в ходе обучения студент в индивидуальной системе компетенций сделал акцент на развитие ОБЩЕПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНЦИИ (вес

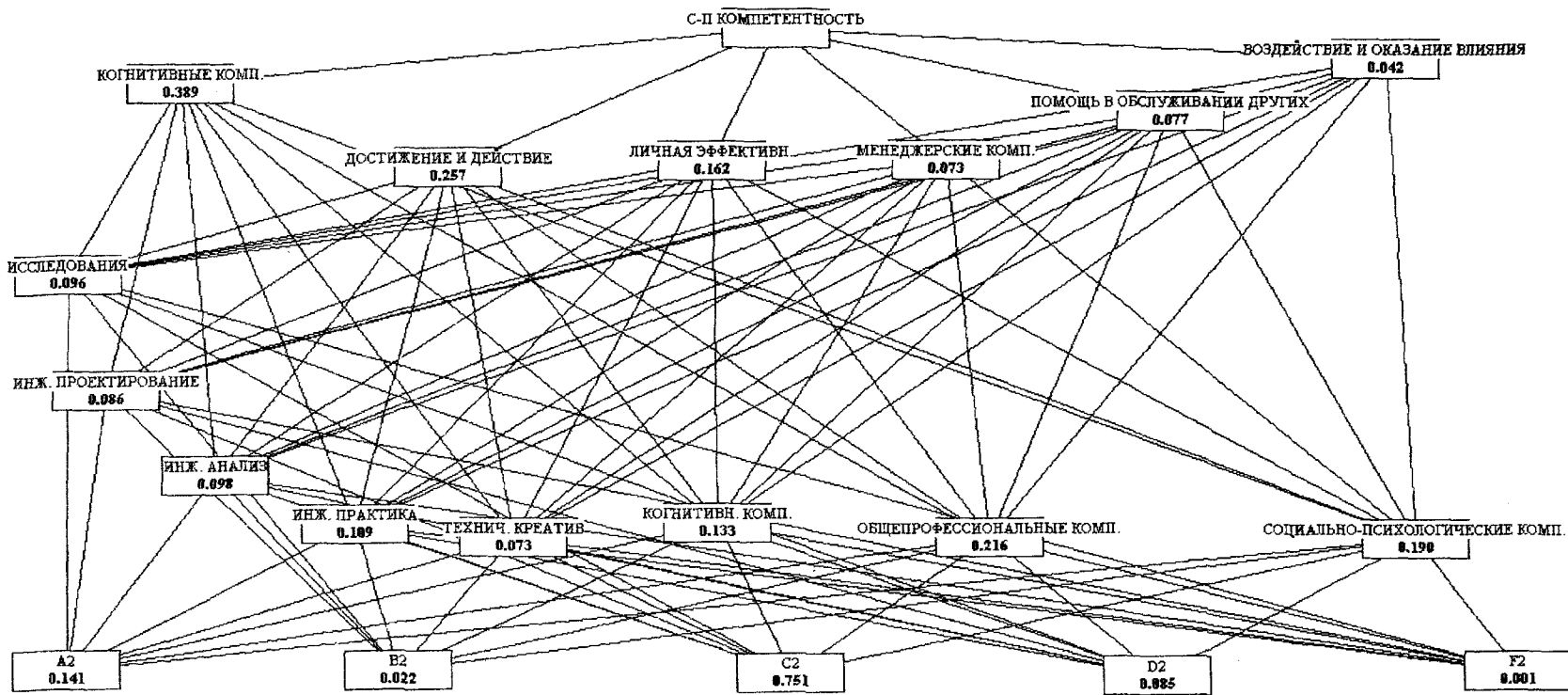


Рисунок 4 – Иерархия социально-профессиональной компетентности молодых специалистов, выпускников системы профессионального образования университетского комплекса (специальность 151001 «Технология машиностроения»)

0,216) и СОЦИАЛЬНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ КОМПЕТЕНЦИИ (вес 0,190). В этой связи суперпозиционное влияние вектора приоритетов системы компетенций «идеального исполнителя» инженерно-технического профиля (второй уровень) и вектора приоритетов сформированной индивидуальной системы компетенций позволяет сделать вывод о том, что молодому специалисту наиболее целесообразно выбрать сферу деятельности С2 – работа не по специальности, т.к. для бакалавра инженерно-технического профиля он имеет явно недостаточный приоритет сформированности именно инженерно-технических компетенций. Если учесть, что в индивидуальной системе его компетенций наличествует относительно высокая доля общепрофессиональных компетенций, то наиболее верным для молодого специалиста будет выбор такой профессиональной траектории, при которой будут востребованы именно эта компетенция. В качестве оптимального варианта трудоустройства такому выпускнику можно предложить, например, получение рабочей профессии технического профиля (токарь, фрезеровщик, сверловщик, инструментальщик и т.д.) или получение более высокого разряда по рабочей профессии, полученной в системе дополнительного профессионального образования, реализуемой на образовательном пространстве технического вуза. Если при этом специалист получил дополнительную подготовку в области автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства, то он может выбрать работу на должностях младшего технического персонала в конструкторском бюро, техническом отделе, отделе стандартизации и т.д. промышленного предприятия.

Итак, проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что американская и европейская модели структурно сопоставимы, однако каждая модель имеет свою специфику: американская модель ориентирована на «деятельностную» оценку «идеального исполнителя» как субъекта профессиональной (производственной) среды, тогда как европейская модель компетенций специалиста инженерно-технического профиля ориентирована именно оценку индивидуально сформированной системы компетенций, приобретенных в ходе образовательного процесса. Вместе с тем, преимуществом американской модели является решение проблемы шкалирования при измерении компетенций, кроме того, она имеет большой потенциал применимости при формировании системы оценивания компетенций специалистов, работающих на различных должностях технического профиля в условиях реального производства. Поскольку целью нашего дальнейшего исследования является разработка многоуровневой системы оценивания качества подготовки специалистов для машиностроения, то, по-нашему мнению, целесообразно для исследования системы компетенций молодых специалистов технического профиля принять за основу структуру европейской модели инженерного образования [4] а при решении проблемы ее шкалирования – опыт американских исследователей [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Морозова, А.В. Управление процессом профессиональной социализации студентов ссузов в условия модернизации института образования. Монография. [Текст] / А.В. Морозова, Н.А. Фролова. – Орел.: Издательство ОРАГС, 2005. – 200 с.
- 2 Спенсер, Л. Компетенции на работе [Текст] / Л. Спенсер, С. Спенсер. – М.: Издательство ГИППО, 2010. – 384 с.
- 3 Boyatzis, R.E. The competent manager: A model for effective performance [Text] / R.E. Boyatzis. – New York: Wiley-Interscience, 1982.
- 4 EUR-ACE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.enaee.eu/enaee/presentation.htm>

Киричек Андрей Викторович

Орловский Государственный технический университет, г.Орёл

Доктор технических наук, профессор

Тел.(4862)55-55-24

E-mail: avk@ostu.ru, ti@ostu.ru

Морозова Анна Валентиновна
Кандидат социологических наук, доцент
Орловский государственный технический университет
Тел: (4862) 55-55-24, 54-15-19
E-mail: niotlostu@gmail.com

УДК 620.179.1.082.7:658.58

МИШИН В.В., ПОДМАСТЕРЬЕВ К.В., СЕМЕНОВ В.В., МАЙОРОВ М.В.,
ЧЕРНЫШОВ В.Н., СЕЛИХОВ А.В., ШАТАЛОВ К.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОДШИПНИКА ПО ПАРАМЕТРАМ ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Работа содержит описание используемого оборудования для исследования сопротивления или проводимости подшипников. Приведены результаты экспериментальных исследований динамики сопротивления подшипника качения в процессе приработки подшипника. Подтверждена чувствительность сопротивления (проводимости) к техническому состоянию трибосопряжения (нагрузка, вид и количество смазочного материала).

Ключевые слова: подшипник, сопротивление трибосопряжения, приработка подшипника, микроконтактирование, эксперимент

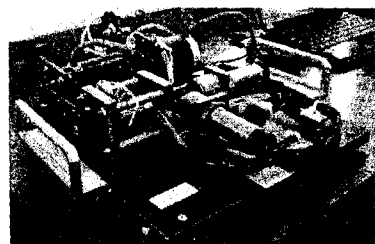
The paper contains a description of the equipment used to study the resistance of bearings. The experimental results of the dynamics of resistance rolling bearing during running. Confirmed the sensitivity of the resistance (conductivity) to the technical state tribounit (load, type and quantity of lubricant).

Keywords: the bearing, resistance of contact, bearing deformation

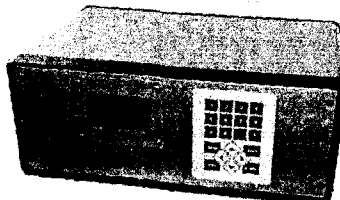
ЦЕЛЬ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Общей целью экспериментальных исследований является получение качественной и количественной информации о сопротивлении или проводимости зоны трения трибосопряжения при воздействии на неё различных внешних и внутренних факторов (на примере подшипника качения). Результаты таких исследований позволят уточнить существующие и разработать новые методы диагностирования трибосопряжений.

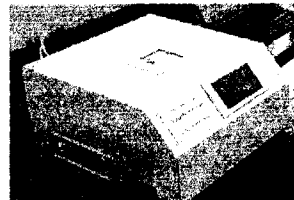
В качестве основного механического стенда использовался стенд приработки подшипников качения (СППК) изображенный на рисунке 1, технические характеристики которого приведены в таблице 1.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Состав СППК:

а – электромеханический блок; б – электронный блок измерений и управления; в – СППК в защитном кожухе

Таблица 1 - Технические характеристики

Осевая нагрузка, Н	0 - 100
Радиальная нагрузка, Н	0 - 100
Частота вращения, об/мин	0 - 1000
Измеряемая температура, °С	0 - 100
Напряжение питания, В	220±22

В качестве измерительного оборудования для оценки временных функций вероятности микроконтактирования, оцениваемой по диагностическому параметру НИВ использовался аналоговый модуль, структурная схема которого представлена на рисунке 2. Характеристики модуля приведены в таблице 2.

Принцип работы модуля основан на регистрации микроразрывов смазочной пленки в зоне трения трибосопряжения (подшипника). При разрыве смазочной пленки (микроконтактировании) электрическое сопротивление между деталями трибосопряжения резко падает до значений в несколько десятков Ом (соответственно, увеличивается проводимость). В рассматриваемом модуле трибосопряжение через соединительные кабели включено в мостовую схему 2 в качестве одного из её плеч. Особенностью схемы является низкое сопротивление резисторов плеч (не более 30 Ом). Такой выбор значения сопротивлений позволяет максимально снизить входное сопротивление модуля, что в значительной мере повышает помехозащищенность. Для улучшения метрологических характеристик модуля мостовая схема питается от источника 1 стабильного тока.

Таблица 2 – Характеристики аналогового модуля

Время ($T_{и}$) измерения НИВ, с	0,01 до 10 (определяется интегрирующим узлом)
Порог срабатывания по сопротивлению ($R_{пор}$), Ом	70±15
Минимальная длительность учитываемых импульсов микроконтактирования, мкс, не более	0,1
Значение опорного напряжения на объекте, мВ:	150±20
Выходной сигнал 1) импульсный сигнал напряжения, В 2) временной аналоговый сигнал напряжения, В	от 0 до 2,5 ±10
Габаритные размеры (корпуса измерителя), мм, не более	80x90x40
Масса, кг, не более	0,2

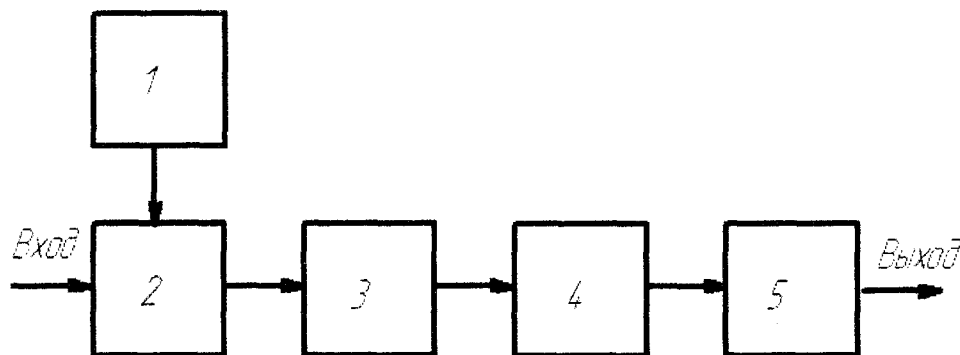


Рисунок 2 – Структурная схема модуля:

1 – источник стабилизированного тока, 2 низкоомная мостовая схема, 3 – дифференциальный измерительный усилитель, 4 – формирователь импульсов, интегратор

Мостовая схема преобразует электрическое сопротивление трибосопряжения в дифференциальное напряжение, усиливаемое далее дифференциальным инструментальным усилителем 3 в высокой полосой пропускания и значением скорости нарастания выходного сигнала не менее 1600 В/мкс. Выходной сигнал с дифференциального усилителя поступает на формирователь 4 импульсов, который формирует на своем выходе импульс напряжения с нормированной амплитудой при достижении измеряемого сопротивления порогового значения (70 -75 Ом). С выхода формирователя импульсов сигнал поступает на интегрирующую цепочку 5, которая формирует аналоговое напряжение, пропорциональное суммарной длительности микроконтрактирования. Далее унифицированный аналоговый сигнал регистрируется с помощью цифрового модуля DSO 2090 (рисунок 3).



Рисунок 3 – Модуль для регистрации сигналов DSO 2090

Для измерения сопротивления используется преобразователь, выполненный по схеме, изображенной на рисунке 4. В связи с тем, что сопротивление в трибосопряжении изменяется от единиц Ом до единиц МОм, необходимо разбиение данного диапазона на ряд поддиапазонов. В частности, при проектировании данной схемы было выбрано два поддиапазона – от 1 Ом до 1 кОм и от 1 кОм до 1 МОм. Для этого используется два источника тока ИТ1 и ИТ2, которые коммутируются сигнальным реле КУ, управляемым устройством управления УУ.

Стабильный ток источников ИТ1 и ИТ2 вызывает падение напряжения на трибосопряжении, которое усиливается инструментальным усилителем. Так же перед усилителем стоит блок ограничения для защиты схемы от перенапряжения измерительной схемы. Инструментальный усилитель построен на основе интегральной микросхемы INA111. Данный усилитель построен на основе топологии с токовой обратной связью, что позволяет обеспечить широкий динамический диапазон (2 МГц при

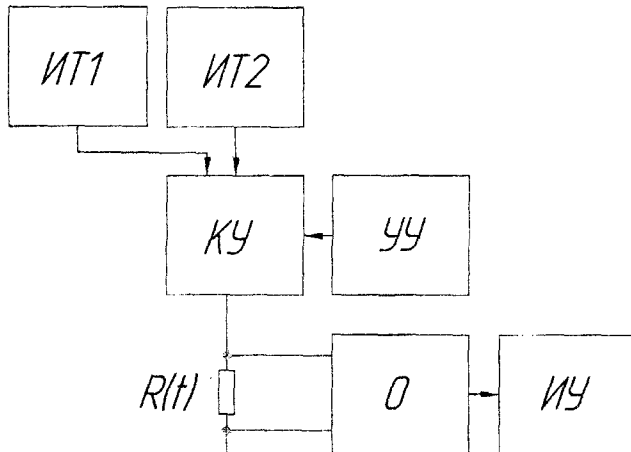


Рисунок 4 – Схема структурная преобразователя сопротивления:

ИТ1, ИТ2 – источники тока, КУ – коммутирующее устройство, УУ – устройство управления, О – ограничитель, ИУ – инструментальный усилитель

коэффициенте усиления равном 10). Выходной сигнал схемы лежит в диапазоне от 0 до 5 В.

Рассмотренные измерительные преобразователи после соответствующих испытаний и градуировки применялись в нижеприведенных исследованиях.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРИРАБОТКИ

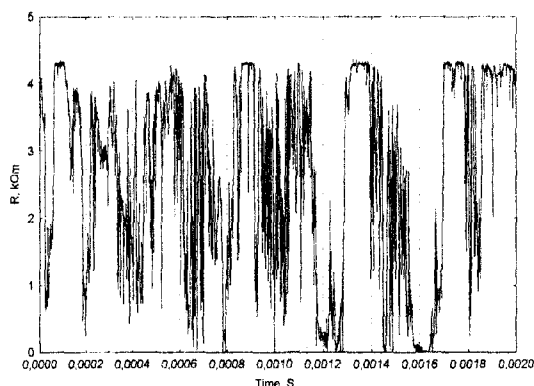
Целью данного эксперимента было получение измерительной информации непосредственно из зоны трения подшипника в виде электрического сигнала, пропорционального электрическому сопротивлению зоны трения в широком частотном диапазоне (до 2,5 МГц). Ранее эксперименты с таким частотным диапазоном не проводились.

Условия проведения эксперимента: подшипник 1000900 с предварительной промывкой керосиновой смесью, смазка 6 мкл минерального масла И-26А, температура подшипника до начала эксперимента – 26 °С, частота вращения 300 мин⁻¹ – поддерживалась стабильной в течение эксперимента, радиальная нагрузка 20 Н, осевая нагрузка 0Н. Все исследования проводились в лабораторных помещениях при нормальных климатических условиях.

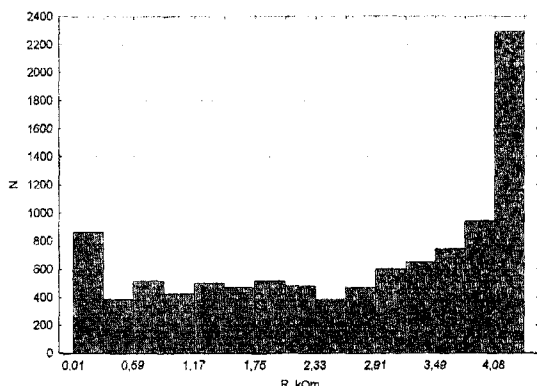
Методика проведения эксперимента следующая: подшипник устанавливался на экспериментальный стенд, подключались устройства нагружения и средства диагностирования, устанавливалось требуемое значение нагрузки и частоты вращения, проводилась регистрация начальных условий эксперимента, осуществлялась приработка подшипника в режиме одностороннего вращения с регистрацией диагностических параметров (электрическое сопротивление, НИБ, температура подшипника). Эксперимент прекращался при стабилизации регистрируемых параметров (зона стабилизации определяется априорно или ограничивается 20% размахом от среднего значения измеряемых диагностических параметров).

Регистрация временной функции электрического сопротивления осуществлялась интервально, длительность каждого интервала составляла 2 мс, в 1 минуту проводилось 4 измерения. В качестве примера на рисунке 5 представлена диаграмма временной функции сопротивления в окне программного пакета STATISTICA. Анализ сигнала показывает, что в начале процесса приработки электрическое сопротивление зоны трения флуктуирует в значительных пределах. Данное обстоятельство говорит о значительной нестабильности процессов, протекающих в зоне трения.

На рисунке 5 (б) представлена гистограмма распределения сигнала сопротивления по уровням, показывающая, что на первой стадии приработки уровни сопротивления от 0,3 кОм до 3 кОм практически равновероятны, а преобладают уровни низкого сопротивления от 0,1 кОм до 0,3 кОм и уровни высокого сопротивления от 4 кОм. Среднее сопротивление составило 2,63 кОм.



а)



б)

Рисунок 5 - Реализация сигнала сопротивления:
а – временная зависимость; б- гистограмма

Наличие значительного количества уровней низкого сопротивления до 0,3 кОм характеризует присутствие в зоне трения преобладающих пластических деформаций с разрушением поверхностных слоев и прочих структур «третьего тела». Наличие зоны высокого сопротивления (выше 4 кОм) свидетельствует о вхождении трибосопряжения в режим жидкостного трения в некоторые интервалы времени. Данное предположение подтверждается и результатом измерения НИВ на начальном интервале приработки. Среднее значение НИВ составило 0,096, что позволяет утверждать о целостности смазочной пленки в исследуемом подшипнике в течение 90,4 % времени исследования.

На рисунке 6 представлена временная диаграмма сигнала сопротивления, отражающая изменение среднего значения сопротивления во времени. Анализ диаграммы показывает, что среднее значение сопротивления подшипника в процессе приработки увеличивается. При этом уменьшается диапазон разброса мгновенного сопротивления – уменьшение СКО сигнала и доверительного интервала. Данные обстоятельства характеризуют окончание или значительное снижение интенсивности изменения характеристик микрогеометрии поверхностей трения в процессе приработки.

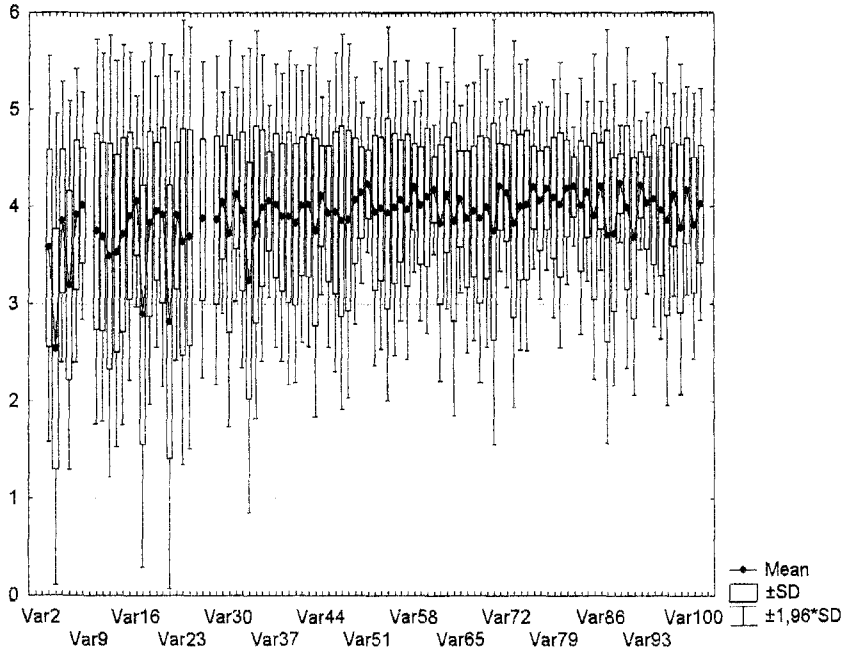


Рисунок 6 – Временная диаграмма сигнала сопротивления

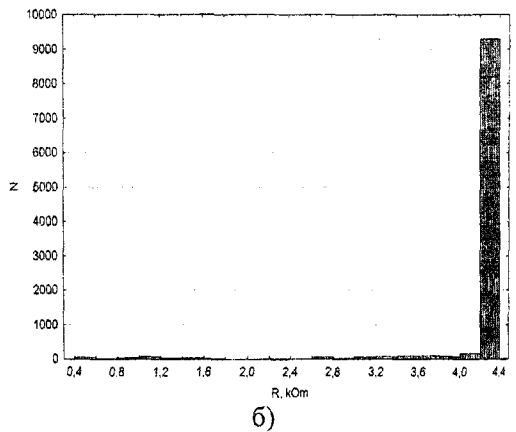
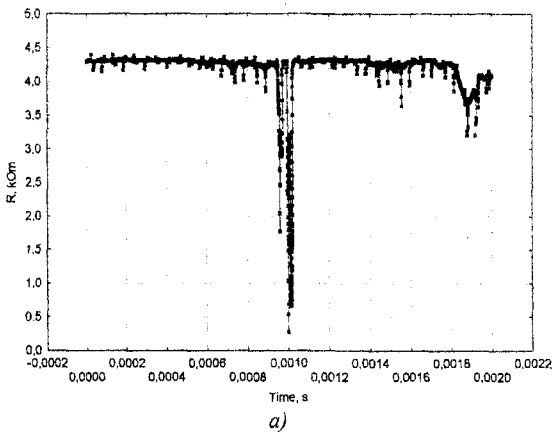
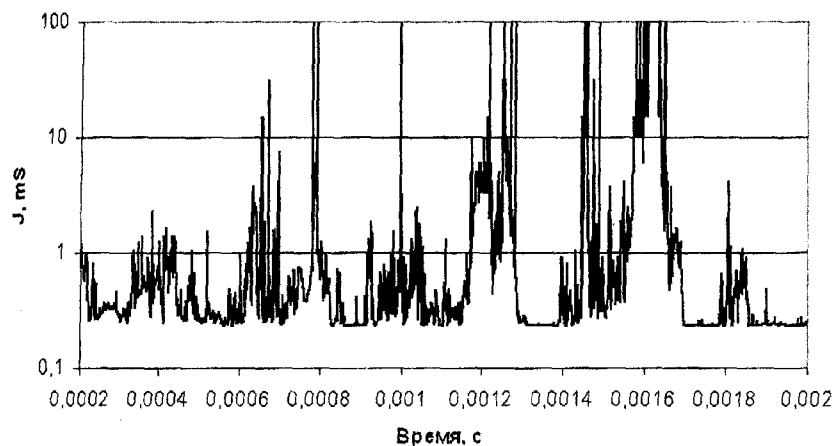


Рисунок 7 – Реализация сигнала сопротивления на конечной стадии приработки: а – временная зависимость; б- гистограмма

Как видно, основная масса значений сигнала сопротивления находится в диапазоне более 4 кОм, что говорит о жидкостном режиме работы трибосопряжений исследуемого подшипника



(НИВ = 0,000076). Для примера на рисунке 7 приведена временная диаграмма сигнала сопротивления и его гистограмма на конечной стадии приработки.

Для изучения процесса микроконтактирования проведен анализ формы

Рисунок 8 – Временная диаграмма изменения проводимости подшипника

импульсов проводимости (микроконтактов) в подшипнике. В качестве примера, на рисунке 8 представлена диаграмма изменения проводимости подшипника во времени на начальной стадии приработки. Как видно, сигнал проводимости повторяет общие закономерности сигнала сопротивления, но является более наглядным с точки зрения адекватного отражения моментов ухудшения состояния смазочного слоя в контакте трибосопряжения. Чем хуже состояние смазочного слоя или чем сильнее деформированы поверхностные структуры в контактной зоне трибосопряжения, тем выше значение проводимости, что и отражается на диаграмме. Подробный анализ диаграммы в области времен от 0,0006 с до 0,0008 с и интервала от 0,0014 с до 0,0017 с показал, что в сигнале проводимости присутствуют значительные импульсно-колебательные составляющие, предположительно образующиеся в ходе деформационных процессов, происходящих в контактных зонах микронеровностей.

Для анализа формы импульсов микроконтактирования на рисунке 9 представлены несколько типичных записей импульсов контактирования в начальной и конечной стадии приработки с высоким временным разрешением.

Анализ формы импульсов показал присутствие в сигнале значительных быстроизменяющихся процессов с наличием импульсных составляющих (показаны стрелками) при входе в зону микроконтактирования и при выходе из нее. Эти составляющие характерны для начальной стадии приработки и наблюдаются на большинстве импульсах проводимости при микроконтактировании. Предполагается, что эти составляющие вызваны высокоэнергичными пластическими и упруго-пластическими микроконтактированиями и наличием на первом этапе работы трибосопряжения продуктов сильного износа в зонах трения.

На конечной стадии приработки импульсы микроконтактирования по форме отличаются. При входе в зону контактирования и при выходе из нее наблюдается резкий переход проводимости с одного постоянного уровня на другой. Отсутствие быстроизменяющихся колебательных процессов объясняется установившейся микрогеометрией контактирующих поверхностей.

Для контроля процесса приработки на различных стадиях предлагается использовать группу динамических диагностических параметров, основанных на измерении первой производной сигнала проводимости J или сигнала электрического сопротивления R зоны трения: скорость VJ , VR .

Для подтверждения информативности предлагаемых диагностических параметров на рисунке 10 представлена временная диаграмма диагностического параметра VJ для начальной и конечной стадий приработки подшипника. Результаты измерения параметра полно-

стью позволяют говорить о возможности применения динамических диагностических параметров для оценки реального состояния трибосоприжения в процессе приработки.

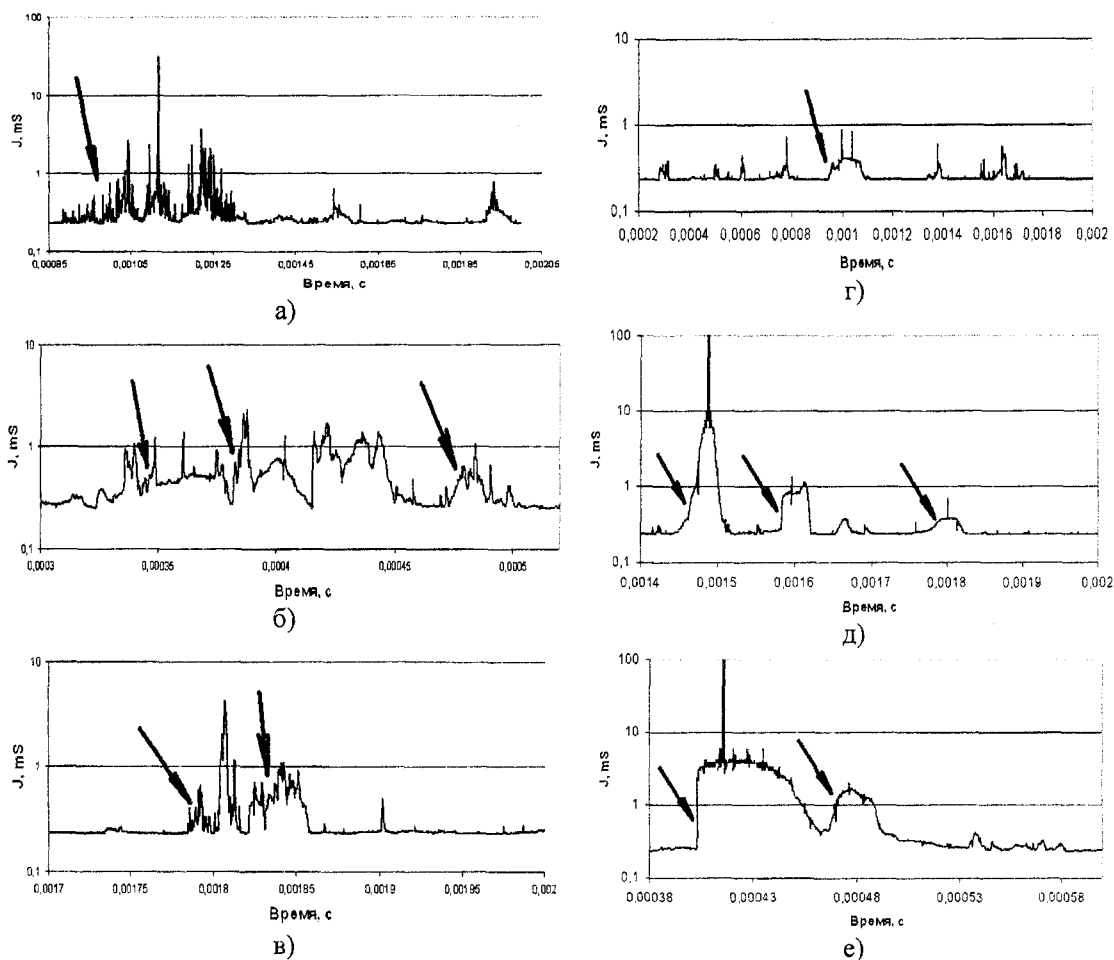


Рисунок 9 – Импульсы микроконтактирования:

а – в – начальная стадия приработки; г – д – конечная стадия приработки

На рисунке 11 представлена диаграмма зависимости сопротивления подшипника от радиальной нагрузки при различных значениях частоты вращения. Как видно, наиболее чувствительным к значению радиальной нагрузки оказался режим работы подшипника при оборотах 300 мин^{-1} . Это обусловлено тем, что при малых значениях скорости вращения и смазочном материале с низкой вязкостью подшипник работает в режиме полужидкостного трения, точнее – в нижней его границе. При этом режиме вероятны упруго-пластические, упругие и пластические контакты микронеровностей и фактическая площадь контакта, определяющая сопротивление стягивания и в конечном итоге, сопротивление подшипника сильно зависят от величины радиальной нагрузки.

При частоте вращения 600 мин^{-1} и 1000 мин^{-1} подшипник преимущественно будет работать в жидкостном и в верхней границе полужидкостного режима. В этом режиме образуется устойчивая пленка смазочного материала, обладающего диэлектрическими свойствами. Это обстоятельство приводит к увеличению сопротивления подшипника, что и нашло свое отражение на рисунке 11 (кривые 1,2). Из полученных диаграмм можно констатировать

чувствительность диагностического параметра среднее сопротивление R_{cp} к изменению радиальной нагрузки при низких скоростях качения.

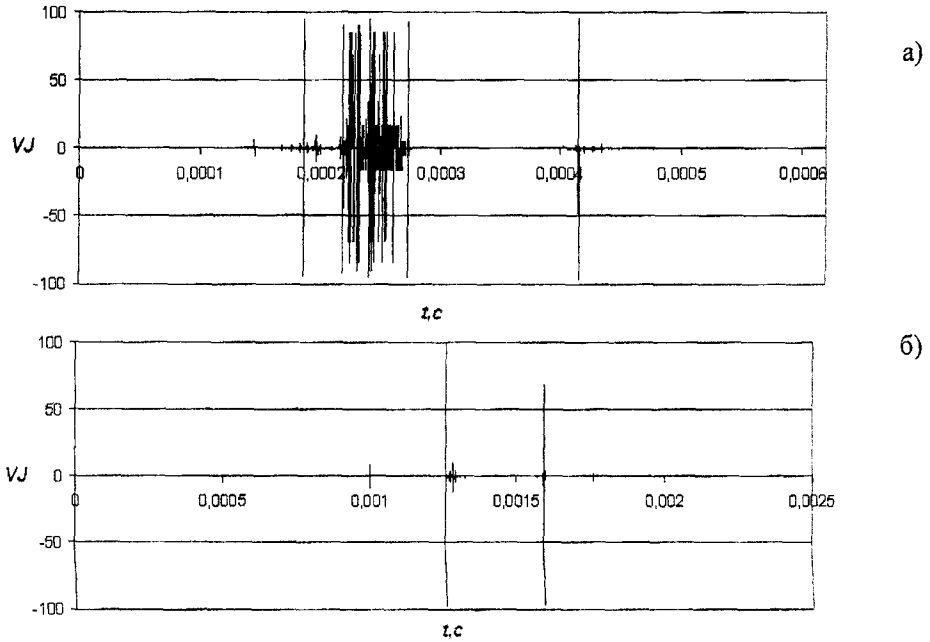


Рисунок 10 – Диаграмма VJ для приработки подшипника:
a - начальная стадия приработки; б - конечная стадия приработки

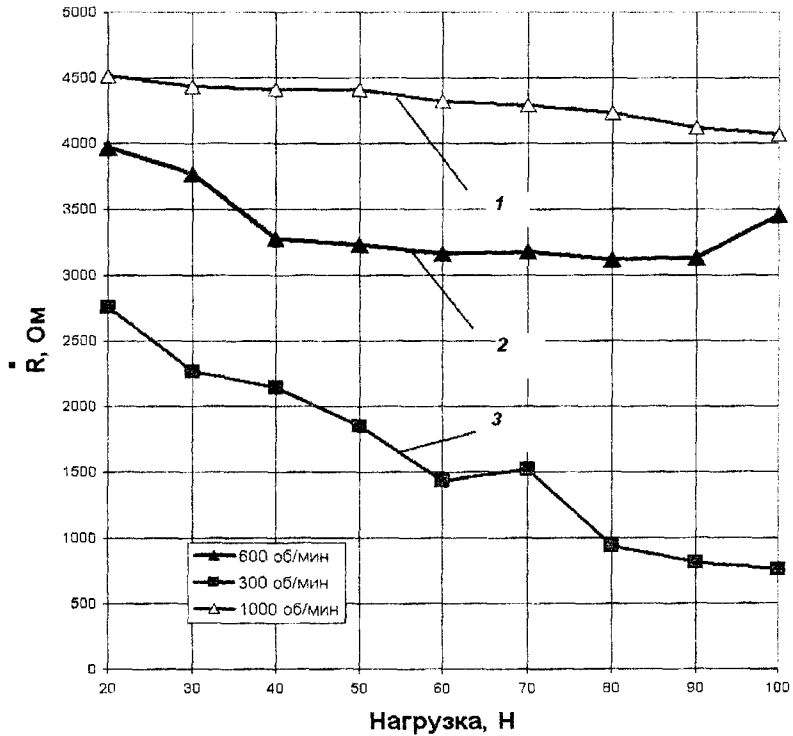


Рисунок 11 – Зависимость сопротивления от радиальной нагрузки

ВЫВОДЫ

1. Высокочастотные записи сигнала электрического сопротивления трибосопряжения и анализ импульсных составляющих сигнала позволяют оценить режим трения в работающем трибосопряжении.
2. Процесс приработки трибосопряжения наглядно отображается при помощи гистограмм сопротивления (проводимости) подшипника.
3. Применение динамических диагностических параметров на основе экспериментальных и теоретических зависимостей дает возможность анализа хода процесса приработки и позволяет выработать критерии его завершения.
4. Диагностические параметры электрического сопротивления и проводимости чувствительны к определяющим техническое состояние трибосопряжения факторам (нагрузка, вид и количество смазочного материала).

Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)», код проекта 2.1.2/2075.

Мишин Владислав Владимирович

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
К.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862)41-67-33
E-mail: vlad89290@gmail.com vm@rbcmail.ru

Подмастерьев Константин Валентинович

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 41-98-21
E-mail: asms-orel@mail.ru

Семенов Вячеслав Вячеславович

Орловский Государственный Технический Университет, г. Орёл
Аспирант, инженер ООО НПФ «Астронэлектроника»
Тел. (4862) 41-98-76
E-mail: Astronelv@mail.ru

Майоров Максим Валерьевич

Орловский Государственный Технический Университет, г. Орёл
Аспирант
Тел. (4862) 41-98-76
E-mail: stigmoto@gmail.com

Чернышов Виктор Николаевич

Орловский Государственный Технический Университет, г. Орёл
Аспирант
Тел. (4862) 41-98-76
E-mail: bukchep@gmail.com

Селихов Алексей Владимирович

Орловский Государственный Технический Университет, г. Орёл
Студент
Тел. (4862) 41-98-76

Шаталов Кирилл Владимирович

Орловский Государственный Технический Университет, г. Орёл
Тел. (4862) 41-98-76

УДК 658.562

В.Б. ПРОТАСЬЕВ, А.В. КОСАРЕВСКАЯ, К.Л. РАЗУМОВ-РАЗДОЛОВ

ФОРМИРОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК ПРИ РАЗРАБОТКЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Предлагается методика определения относительных экспертных оценок с помощью показательных функций, когда эксперты оценивают величины возможных минимальных и

максимальных финансовых потерь или прибылей, а также временные интервалы, на которых возможно возникновение ошибок.

Ключевые слова: экспертная оценка, квалиметрия, управленческое решение

The technique of definition of relative expert estimations with the help of indicative functions when experts estimate sizes of possible minimal and maximal financial losses or profits, and also time intervals on which occurrence of mistakes is possible is offered.

Key words: an expert estimation, measurement of quality, the administrative decision

Почти любое управленческое решение разрабатывается лучше, когда обдумывается его экономическая основа. С давних времен деловые люди, принимая решение шли на риск, т.е. они представляли не только денежную сумму, которую они могли приобрести при удачном завершении какого-то решения, но и убытки при неудачном его исходе.

При логических рассуждениях руководитель считал, что он готов минимально потратить, например, сумму C_{\min} , а максимально C_{\max} . Как и везде в природе, он пользовался понятием допуска, т.е.:

$$T_C = C_{\max} - C_{\min}, \quad (1)$$

где T_C – допуск на возможные потери.

Вместе с тем возможны и решения как внутри поля допуска, так и за его пределами, но их тяжело оценивать квалиметрически, ввиду отсутствия соответствующего математического аппарата.

Необходимо найти зависимость, которая легко нормируется, учитывает различное количество стадий исполнения решения и является относительной величиной (безразмерной), которую можно далее использовать при определении комплексного показателя качества.

В технике, например, при оценке воздействия какой-либо величины (температуры, скорости и т.п.) в течение определенного времени, пути и т.п. [1] часто используются зависимости:

$$P = P_{\max} \cdot \left(\frac{P_{\min}}{P_{\max}} \right)^{\frac{t_{\max} - t}{t_{\max}}} \quad (2)$$

или похожая формула:

$$P = P_{\min} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right)^{\frac{t_{\max} - t}{t_{\max}}} \quad (3)$$

Зависимость (2) показывает нарастание величины P по мере изменения параметра t , зависимость (3) его уменьшение. Если в качестве предельных значений t использовать t_{\min} или t_{\max} , зависимости (2) и (3) покажут предельные значения P , т.е. P_{\min} и P_{\max} .

Например, если в зависимости (2) принять $t = t_{\max}$, то

$$P = P_{\max} \cdot \left(\frac{P_{\min}}{P_{\max}} \right)^{\frac{t_{\max} - t_{\max}}{t_{\max}}} = P_{\max},$$

а если $t = 0$, то

$$P = P_{\max} \cdot \left(\frac{P_{\min}}{P_{\max}} \right)^1 = P_{\min}.$$

При экспертных оценках величина t может сохранять как прежний физически смысл, так и приобретать новый, например, это может быть изменение цены, количества изделий в партии, изменение числа потенциальных потребителей, изменение ставок, величины рисков и т.п.

Примем условие, что всегда, чем выше бальная оценка, тем лучше ожидаемый результат. Поэтому при оценке положительных эффектов, например, прибыли при увеличении параметра t будем использовать формулу (2), а бальную оценку Q формировать как отношение P_i к минимально возможной величине P_{\min} . Тогда величина P_i изменяется от P_{\min} до P_{\max} , а бальная оценка Q определится как:

$$Q = \frac{P_i}{P_{\min}} = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \cdot \left(\frac{P_{\min}}{P_{\max}} \right)^{\frac{t_{\max} - t}{t_{\max}}} \quad (4)$$

При $t = 0$, т.е. все возможности упущены:

$$Q_{\min} = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \cdot \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = 1.$$

При $t = t_{\max}$, т.е. все возможности реализованы:

$$Q_{\max} = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \cdot \left(\frac{P_{\min}}{P_{\max}} \right)^0 = \frac{P_{\max}}{P_{\min}}.$$

Если $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$, то $1 \leq Q_i \leq \frac{P_{\max}}{P_{\min}}$.

Если положительный эффект возрастает по мере уменьшения параметра t , используется формула (3), а бальная оценка Q формируется как отношение величины P_i к максимально возможной величине P_{\max} . P_i также изменяется в пределах от P_{\max} до P_{\min} . Бальная оценка Q определяется как:

$$Q = \frac{P_i}{P_{\max}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right)^{\frac{t_{\max} - t}{t_{\max}}} \quad (5)$$

При $t = 0$, т.е. все возможности реализованы:

$$Q_{\max} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \cdot \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = 1.$$

Если $t = t_{\max}$, т.е. все возможности упущены:

$$Q_{\min} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right)^0 = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}.$$

В итоге, если $t_{\min} < t < t_{\max}$, то $\frac{P_{\min}}{P_{\max}} \leq Q_i \leq 1$.

При оценке отрицательных эффектов, а чем он ниже оценка Q должна быть больше согласно принятому условию, тоже возможны две ситуации:

1. Когда отрицательный эффект возрастает по мере увеличения параметра t .
2. Когда отрицательный эффект возрастает по мере уменьшения параметра t .

Остальные ситуации являются частными случаями рассмотренных. В первом случае используется формула (2)

$$Q_i = \frac{P_{\min}}{P_i} = \frac{P_{\min}}{P_{\max} \cdot \left(\frac{P_{\min}}{P_{\max}}\right)^{t_{\max} - t}} \quad (6)$$

При $t = 0$, когда потери минимальны:

$$Q_{\max} = 1.$$

При $t = t_{\max}$, когда потери максимальны:

$$Q_{\min} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}.$$

В этом случае, если $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$, то $\frac{P_{\min}}{P_{\max}} \leq Q \leq 1$.

Во втором случае используется формула (3).

$$Q_i = \frac{P_{\max}}{P_i} = \frac{P_{\max}}{P_{\min} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}}\right)^{t_{\max} - t}}; \quad (7)$$

при $t = 0$, когда потери максимальны:

$$Q_{\max} = 1;$$

и при $t = t_{\max}$, когда потери минимальны:

$$Q_{\min} = \frac{P_{\max}}{P_{\min}}.$$

В случае, когда $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$, то $1 \leq Q \leq \frac{P_{\max}}{P_{\min}}$.

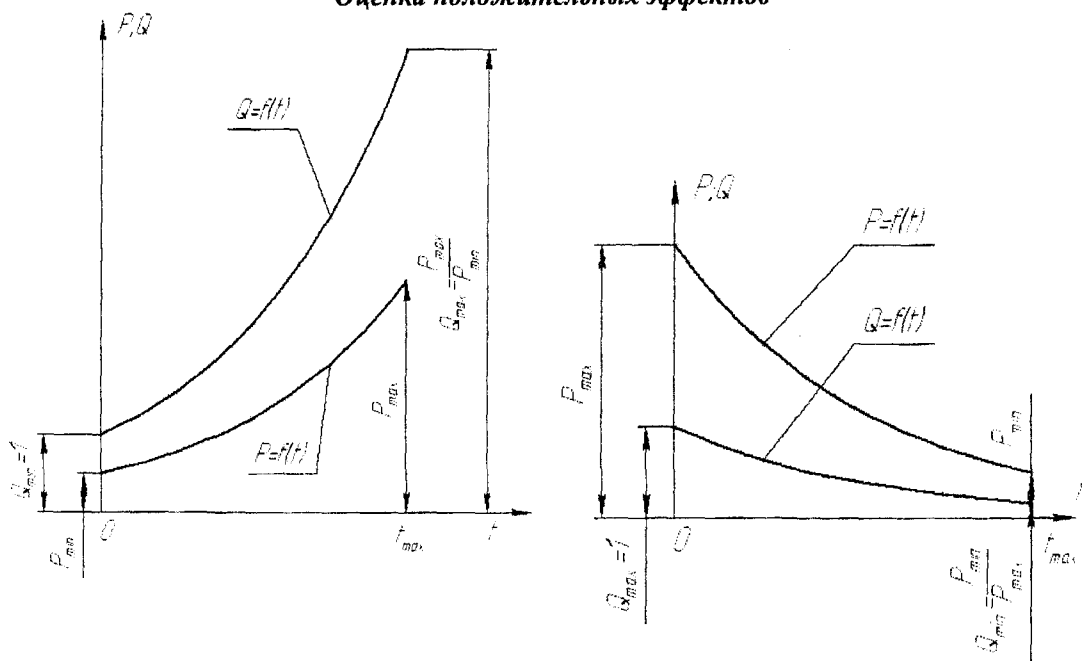
Во всех рассмотренных случаях группа экспертов назначает величины P_{\min} , P_{\max} , определяет параметр t , и, как следствие определяет бальную оценку Q .

Графики изменения величин P и Q приведены на рисунке 1. для всех четырех рассмотренных случаев.

Часто какой-либо параметр оценивается по мере выполнения т.н. стадий или этапов. Например, в технике используется довольно некорректное «правило десяти» [2], согласно которому цена ошибки на каждом последующем этапе проектирования вырастает в десять раз. Такое заключение очень неточно. Между тем, такую ситуацию легко прогнозировать, и нормировать.

Например, управленческое решение (рисунок 2) выполняется в девять стадий [3] и эксперты могут оценить максимальные потери, если ошибка обнаружена на последнем, девятом этапе ($П_9$) и если она обнаружена на первом этапе ($П_1$), когда все легко исправить и потери минимальны.

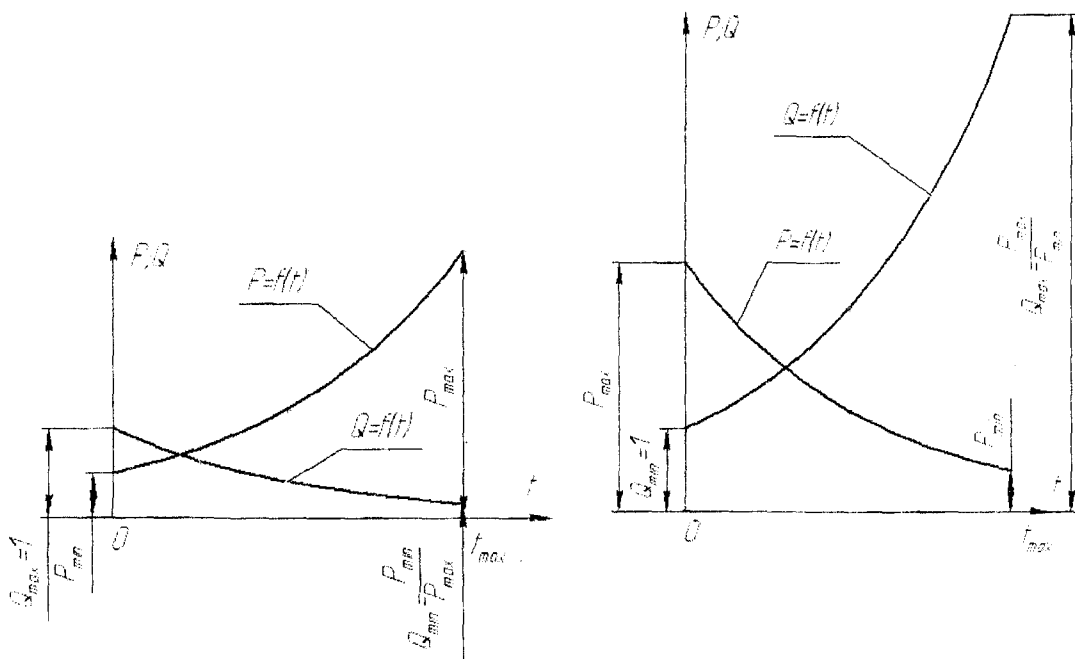
Оценка положительных эффектов



а) эффект возрастает при увеличении t ;

б) эффект уменьшается при уменьшении t ;

Оценка отрицательных эффектов



в) эффект возрастает при увеличении t ;

г) эффект уменьшается при уменьшении t .

Рисунок 1 - Изменение величин P и Q в зависимости от параметра t

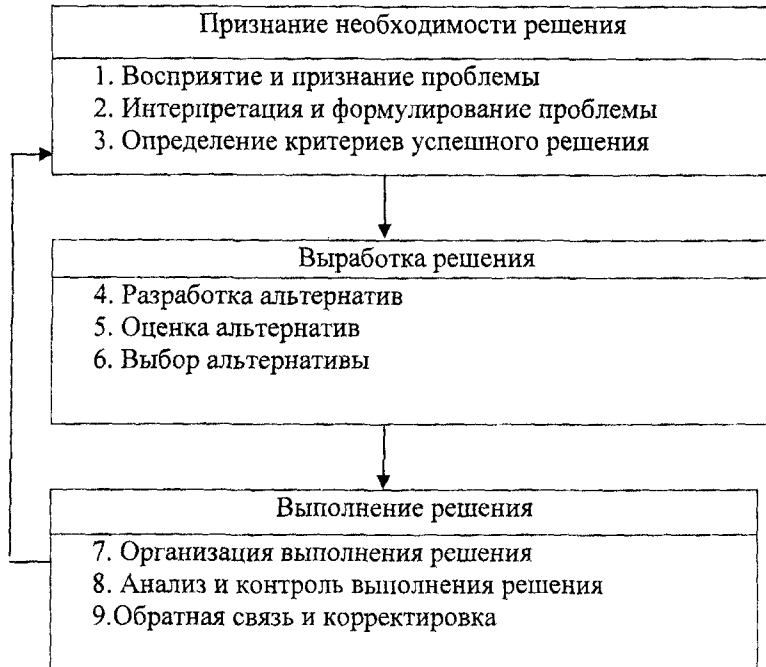


Рисунок 2 - Последовательность (стадии) принятия и выполнения решения

Формула (2) для этого случая примет вид:

$$P_i = P_{\max} \cdot \left(\frac{P_{\min}}{P_{\max}} \right)^{\frac{n_{\Sigma} - n}{n_{\Sigma}}}; \quad (8)$$

где n_{Σ} - общая сумма этапов (в нашем случае 9);

n - номер этапа на котором допущена ошибка.

Если $n = 0$, $P_1 = P_{\min}$ если $n = 9$, то $P_9 = P_{\max}$.

Бальная относительная оценка Q определится, как и ранее, отношением P_{\max} к P_i .

Потери от ошибок, если они допущены на всех этапах (редкий, но принципиально возможный случай) имеют тенденцию к накоплению (рисунок 3). Если ошибок несколько, например две, то величина P_i должна определяться как сумма потерь для этих этапов, которые определяются формулой (8):

$$P_{\min} = P_2 + P_6; \quad (9)$$

где 2 и 6 - номера стадий, где, например, допущены ошибки.

Поскольку этапы (стадии) представляют собой временные отрезки, т.е. каждый этап имеет начало и конец, имеется особенность в расчетах величин P и Q . Если $n = 0$, то это начало первого этапа, если $n = 1$, это конец первого этапа и начало второго и т.д.

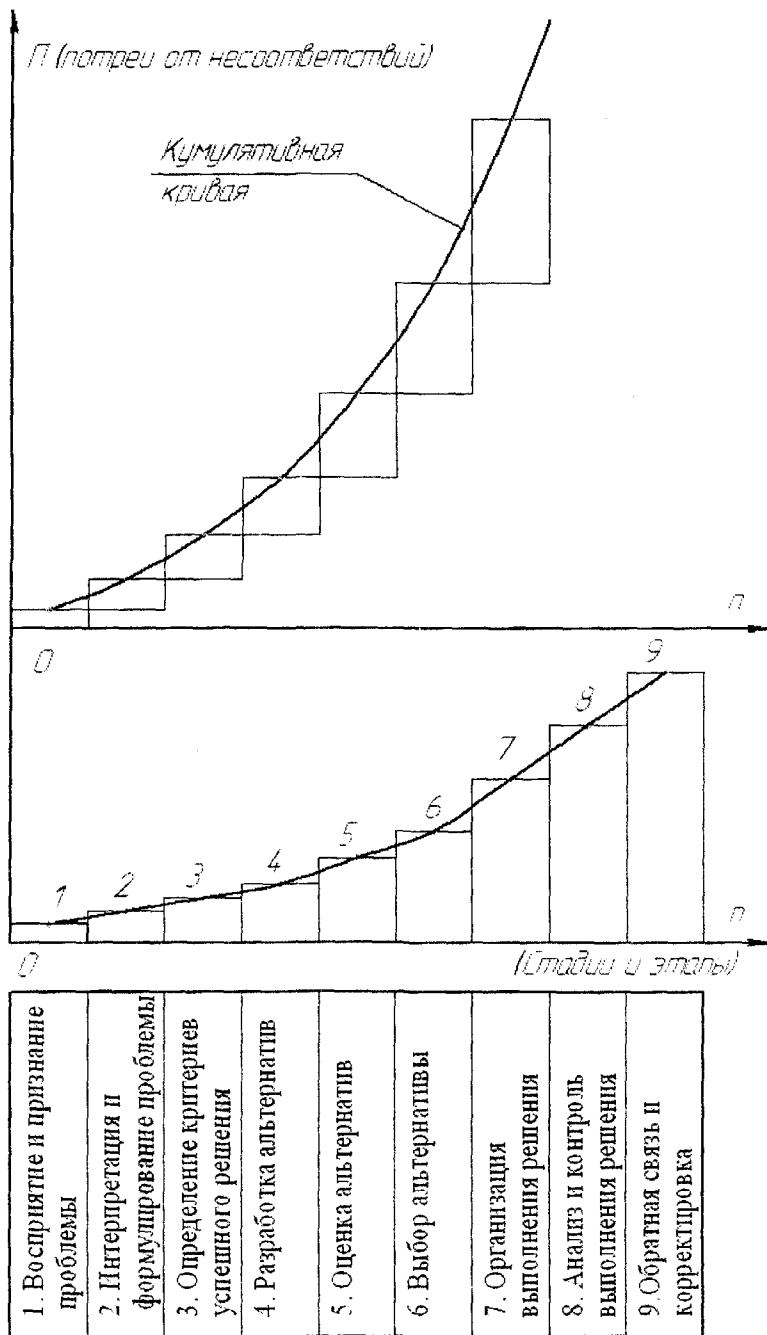


Рисунок 3 - Величины потерь и их накопление на стадиях принятия управленческого решения

Приведем два примера.

1. Допустим, что величина P (возможная прибыль) нарастает по мере быстроты t принятия решения, чем t меньше, тем больше доход.

Эксперты определили $P_{\min} = 5\,000$ руб., $P_{\max} = 100\,000$ руб. и время реализации решения $t_{\max} = 30$ дней.

Допустим, что $t = 0,5t_{\max}$. Формула (5), используемая для этого случая показыва-
ет:

$$Q = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right)^{\frac{t_{\max} - 0,5t_{\max}}{t_{\max}}} = \frac{5000}{100000} \cdot \left(\frac{100000}{5000} \right)^{0,5} = 0,05 \cdot 20^{0,5} = 0,223$$

2. Допустим, что ошибка допущена на третьей стадии разработки управленческо-
го решения.

Эксперты определили $\Pi_{\min} = 5\,000$ руб., а $\Pi_{\max} = 50\,000$ руб.

$$Q = \frac{\Pi_{\max}}{\Pi_i} = \frac{\Pi_{\max}}{\Pi_{\max} \cdot \left(\frac{\Pi_{\min}}{\Pi_{\max}} \right)^{\frac{n_{\Sigma} - 3}{n_{\Sigma}}}} = \frac{1}{\Pi_{\max} \cdot \left(\frac{5000}{50000} \right)^{\frac{9-3}{9}}} = 4,64.$$

Если ошибка обнаружена вначале проектирования ($n = 0$), то $Q_{\max} = \frac{\Pi_{\max}}{\Pi_{\min}} = 5$,

если на последней стадии ($n = 9$) $Q_{\max} = \frac{\Pi_{\max}}{\Pi_{\max}} = 1$.

Таким образом, предложена универсальная методика формирования бальных оце-
нок, учитывающая реальные условия, включающие заданный допуск на возможные потери
(прибыль) и управляемые факторы t и n .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Протасьев В.Б., Илюхин С.Ю. Определение формы заготовок, получаемых ПВП
с учетом закономерностей деформирования/ Деформация металла в многовалковых калиб-
рах. – Магнитогорск, 1987.

2 Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров.- Москва, Экономика,
1982. 256 с.

Протасьев В.Б.

Доктор технических наук, профессор
Тулский государственный университет
Тел.: (4872) 37-33-30
E-mail: imstulgu@pochta.ru

Косаревская А.В.

Эксперт
Москва, ЭОС
Тел.: 8(916) 352-10-67
E-mail: kosarevskaya@eos.ru

Разумов-Раздолов К.Л.

Кандидат технических наук
Начальник управления производственного развития
Москва, ООО «Русэлпром»
Тел.: 8(915) 155-29-56
E-mail: rk1@ruselprom.ru

Т.Ф. ХАЛИТОВ, М.М. ЗАКИРНИЧНАЯ

**ДЕТЕКТИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ТРЕЩИНЫ
НА ВАЛУ РОТОРНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА И ВИБ-
РОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**

В данной работе представлены исследования, направленные на разработку диагностической модели по определению наличия, степени развития и местоположения усталостной поперечной трещины на валу роторной системы на основе вибродиагностического анализа. Показано влияние размера дефекта на амплитуды гармоник спектра вибрации в низкочастотном диапазоне. Методом конечных элементов проведен модальный анализ роторной системы без дефектов и при наличии поперечной трещины, по результатам которого определен характер влияния глубины и местоположения трещины на собственные частоты системы. Сделан вывод о возможности определения местоположения и степени развития по анализу спектра вибрации в области собственных частот системы.

Ключевые слова: роторная система, усталостная поперечная трещина, собственная частота колебаний, спектр вибрации, модальные характеристики.

This paper presents researches aimed at developing diagnostic model to determine the presence, size and location of a fatigue cross crack on the shaft of rotor system based on vibration monitoring analysis. The influence of a crack size on vibration spectrum harmonics amplitudes in low-frequency range is shown. Modal analysis of defect-free rotor system and subject to presence of cross crack was carried out using a finite element method. Behavior of natural frequencies from size and location of defect was defined. It was concluded that detecting of fatigue cross crack size and location is possible by analyze vibration spectrum in range of natural frequencies.

Key words: rotor system, fatigue transverse crack, natural frequency, vibration spectrum, modal characteristics.

Значительную часть оборудования нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятий составляют насосные агрегаты, надежная работа которых обеспечивает безопасность и непрерывность технологических процессов. Данный тип оборудования подвергается различным видам образования дефектов и разрушений. Одним из наиболее серьезных причин выхода из строя насосных агрегатов является усталостное разрушение вала ротора, вероятность которого повышается в процессе длительной эксплуатации в результате действия термических, циклических и механических нагрузок [1, 2]. Усталостные трещины в основном возникают в местах конструктивных концентраторов напряжений: шпоночные пазы, галтельные переходы, у основания резьбы. Также причинами образования усталостных трещин могут быть дефекты, возникающие при изготовлении и ремонте валов (шлифовочные и термические трещины), дефекты металлургического происхождения (закаты, волосовины, флокены и др.) [1]. С точки зрения обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов большое значение представляет детектирование усталостной трещины валов роторов насосных агрегатов на ранней стадии развития, так как ее рост до значительных размеров может послужить причиной развития аварийной ситуации. В связи с этим интерес представляют методы, позволяющие диагностировать образование и развитие дефектов в процессе эксплуатации, наибольшее распространение среди которых получили методы виброакустической диагностики.

С целью предотвращения возможных разрушений валов роторов насосных агрегатов вследствие образования усталостных трещин необходимо определить диагностические признаки, характеризующие ее наличие, степень развития и местоположение. Несмотря на то, что в ряде работ [2 - 4] в качестве таких признаков предлагается оценивать изменение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) низкочастотных гармонических составляющих спектра вибрации, идентификация поперечной трещины среди других неисправностей (несоосность, дисбаланс, изгиб вала, перекос осей) при этом затруднена. Диагностирование поперечных трещин также возможно на основе анализа вибрации в процессе выбега ротора на

критических частотах 1-го и 2-го рода, субгармонических резонансах на оборотной частоте равной $1/2$, $1/3$ критической частоты [5 - 7]. Однако данные методы используются только для наиболее ответственных агрегатов, таких как паровые турбины, газотурбинные установки тепло и гидроэлектростанций, авиадвигатели и т.д., в то время как их применение для диагностирования насосных агрегатов нефтеперерабатывающих предприятий считается экономически нецелесообразным. Следовательно, актуальным направлением является разработка дополнительных методов раннего детектирования усталостной поперечной трещины на валу ротора насосного агрегата существующими инструментами вибродиагностических лабораторий, одним из которых может быть метод, основанный на анализе спектральных данных вибрации в области собственных частот колебаний роторной системы.

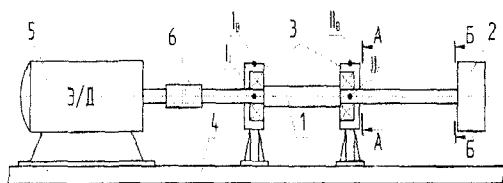


Рисунок 1 – Принципиальная схема лабораторной установки

Влияние поперечной трещины на вибрационные свойства ротора изучалось на лабораторной установке, имитирующей простейшую роторную систему вал-диск (рисунок 1). Экспериментальная установка состоит из горизонтального вала 1, на котором с помощью зажимного винта закреплен стальной диск 2. Диаметр консоли вала равен 7,5 мм, диаметр пролета – 12 мм. Как наиболее употребляемая при изготовлении

валов насосных агрегатов для вала экспериментальной установки была выбрана сталь 40Х (ГОСТ 4543-71). Вал вращается в опорах 3. Каждая опора представляет собой металлический корпус, укрепленный на станине-основании 4. В корпусе опоры размещается латунная втулка, играющая роль подшипника скольжения. Вращение вала осуществляется электродвигателем постоянного тока 5 через гибкую муфту 6. Скорость вращения вала составляла 40 Гц. Замеры вибрации осуществлялись в точках I и II в горизонтальном (Г) и вертикальном (В) направлениях при условии бездефектного состояния вала и с трещиноподобным дефектом различного размера. Для проведения измерений использовался виброанализатор машинного оборудования модели CSI-2120, широко применяемый в лабораториях вибродиагностики нефтеперерабатывающих предприятий. Результаты замеров обрабатывали в специальном программном комплексе MASTERTREND, предназначенном для частотного и статистического анализа механических вибраций.

Для определения максимального размера наносимого трещиноподобного дефекта проводился расчет критической глубины трещины, превышение которой приводит к полному разрушению вала. В соответствии с [1, 8] для стали 40Х были приняты следующие свойства: предел циклической выносливости 350 МПа, циклическая вязкость разрушения $K_{fc} = 60 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, пороговое значение (КИН) коэффициента интенсивности напряжения $K_{th} = 5 \div 8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Расчет на статическую прочность вала лабораторной установки от действия крутящего и изгибающего момента показал, что напряжения в сечении А и Б отличаются незначительно и составляют, соответственно, 25,6 МПа и 24,6 МПа, что значительно меньше предела выносливости материала. Исходя из этого, можно предположить, что причиной образования усталостных трещин в большинстве случаев являются первоначальные дефекты. Поэтому на следующем этапе исследований был проведен расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) вала лабораторной установки при условии наличия микродефекта. В месте предполагаемого концентратора напряжений была смоделирована поверхностная трещина глубиной 100 мкм. Расчет проводился в конечно-элементном программном комплексе (ПК) ANSYS. Для расчета использовалась упрощенная идеализованная модель: вал был представлен как консольно-закрепленная балка круглого сечения с приложенной изгибающей нагрузкой (рисунок 2). Величина нагрузки рассчитана таким образом, чтобы напряжения, возникающие на внешнем контуре, соответствовали напряжениям, рассчитанным по III теории прочности от изгибающего и крутящего момента (25,6 МПа).

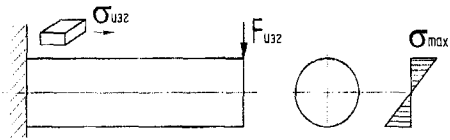


Рисунок 2 – Принципиальная расчетная схема

в соответствии с длиной дефекта. Анализ НДС (рисунок 3, б) показал, что размер зоны пластичности у вершины трещины значительно меньше ее глубины, т.е. выполняется плоское напряженное состояние. При этом максимальные напряжения в вершине трещины составили 570 МПа, которые далее использовались при расчете критического размера дефекта.

При создании расчетной конечно-элементной модели (КЭМ) использовался шестигранный двадцати узловой элемент 2-го порядка SOLID95. В зоне фронта трещины в соответствии с рекомендациями [8] выполнено сгущение сетки (рисунок 3, а). Трещина моделировалась отсутствием граничных условий в сечении (полного закрепления в заделке)

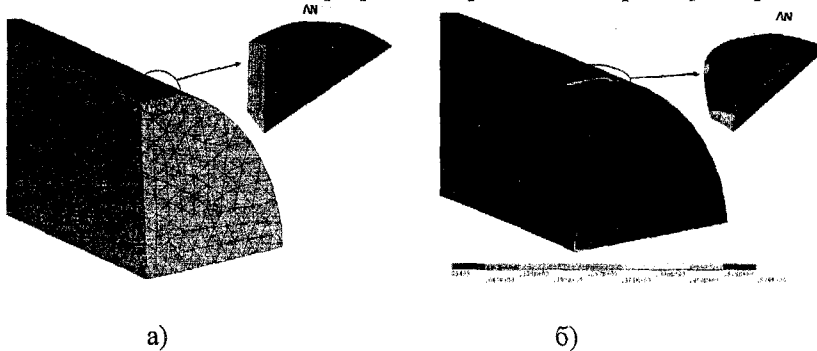


Рисунок 3 - Расчет НДС идеализированной модели при условии наличия микродефекта
а) расчетная КЭМ 1/4 фрагмента вала и вблизи трещины; б) распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в вершине трещины

Критический размер трещины определялся условием достижения КИН циклической вязкости разрушения K_{fc} по соотношению Ирвина [8] $K(\sigma_{max}, l_c) = K_{fc}$ и составил 3,53 мм. Достижение таких значений является недопустимым, поэтому для исследований максимальный размер трещины был принят равным 3 мм (глубина, приблизительно соответствующая переходу от равномерного роста усталостной трещины к ускоренному). Трещиноподобный дефект задавался в виде поперечного надреза шириной 300 мкм электроискровым методом. Одна партия валов изготавливалась с дефектом в сечении А, вторая – в сечении Б. Размеры дефектов были приняты 0,5; 1; 2; 2,5 и 3 мм, соответственно 3, 10, 20, 30, 40 % от поперечного сечения вала. Выбранные сечения, как показали литературные данные [1, 2] и опыт эксплуатации, соответствуют местам наибольшей вероятности образования усталостных трещин: сечение А соответствует гальтельному переходу с диаметра вала под подшипник на диаметр консоли, сечение Б - с диаметра вала консоли на диаметр посадки под колесо.

Известно, что наличие трещины приводит к изменению (ассиметрии) жесткости роторной системы в двух взаимно-перпендикулярных направлениях в зависимости от ее пространственного положения. Причиной этого является эффект периодического открытия и закрытия трещины в процессе вращения в результате действия на систему собственного веса ротора, неуравновешенных сил инерции, приложенного изгибающего момента. Данный механизм называется «дыханием» трещины. В свою очередь ассиметрия жесткости вызывает появление новых компонент вибрационного сигнала.

При оценке технического состояния насосных агрегатов в соответствии с международными и российскими стандартами и нормативно-техническими рекомендациями в качестве нормируемых параметров в большинстве случаев применяют среднеквадратичное значение (СКЗ) виброскорости. С целью определения влияния трещиноподобного дефекта на изменение низших гармоник оборотной частоты были проведены замеры СКЗ виброскорости в низкочастотном диапазоне колебаний (от 0 до 400 Гц). Экспериментальные спектры СКЗ виброскорости представлены на рисунках 4 и 5. Анализируя полученные результаты, было

определено, что при увеличении глубины трещины наблюдается тенденция к росту амплитуд первой и второй гармоник оборотной частоты. Причем рост амплитуды второй гармоники интенсивнее первой. Рост амплитуды первой гармоники наблюдается в пределах глубины трещины от 0 до 10 % от поперечного сечения вала, далее величина амплитуды практически остается постоянной. Причиной этого является то, что вибрация на оборотной частоте в основном зависит от изначальной неуравновешенности ротора из-за дефектов изготовления и монтажа, а незначительное увеличение - дополнительного прогиба от наличия трещины. Более интенсивный рост амплитуды второй гармоники есть следствие влияния асимметрии жесткости. Величины амплитуд СКЗ виброскорости второй гармоники оборотной частоты для систем с различной глубиной трещиноподобного дефекта представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения СКЗ виброскорости второй гармоники оборотной частоты

Глубина трещины относительно поперечного сечения вала, %	СКЗ виброскорости, мм/с			
	Сечение А		Сечение Б	
	Горизонтальное направление	Вертикальное направление	Горизонтальное направление	Вертикальное направление
0	0,5	0,8	0,3	0,2
3	0,8	1,8	0,75	1,05
10	2,3	3	1,1	1,5
20	3,4	3,8	1,3	2,1
30	3,9	4,8	1,5	2,7
40	4,5	5,3	2	4,1

Помимо интенсивного влияния на первую и вторую гармоники, рост глубины трещиноподобного дефекта приводит к незначительному увеличению уровня вибрации на остальных гармониках в диапазоне низких частот. По спектру виброскорости при надрезе в сечении А в горизонтальном направлении (рисунок 4, а) видно, что с третьей по шестую гармонику происходит рост общего уровня вибрации, в вертикальном направлении (рисунок 4, б) наблюдается рост третьей и четвертой гармоник. Похожая по природе картина имеет место при надрезе в сечении Б.

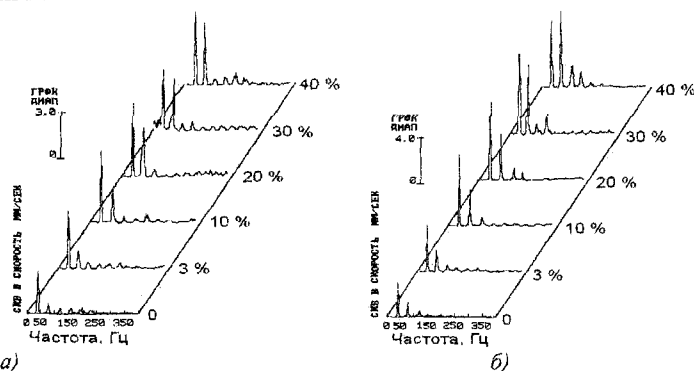


Рисунок 4 - Спектр виброскорости при поперечном надрезе в сечении А:
а) в горизонтальном направлении; б) в вертикальном направлении

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что для роторной системы с дефектом типа усталостной поперечной трещины характерным признаком является более интенсивный рост второй гармоники оборотной частоты по сравнению с первой гармоникой, а также незначительный рост гармоник с третьей по шестую.

Анализ полученных данных подтверждает необходимость и целесообразность использования средств вибродиагностики для выявления и контроля зарождающихся и развивающихся усталостных поперечных трещин. Однако по результатам такого рода измерений сделать вывод о наличии либо отсутствии дефекта можно с определенной степенью вероятности, так как на гармониках в низкочастотном диапазоне проявляются и другие дефекты, та-

кие как неуравновешенность ротора, нарушение соосности валов, неравножесткость ротора. Еще одним недостатком описанной диагностической модели является сложность определения местоположения дефекта. Основным отличием спектров СКЗ виброскорости (рисунок 4 и 5) является лишь то, что при трещиноподобном дефекте в сечении А появляются большие амплитуды вибрации по сравнению с дефектом в сечении Б.

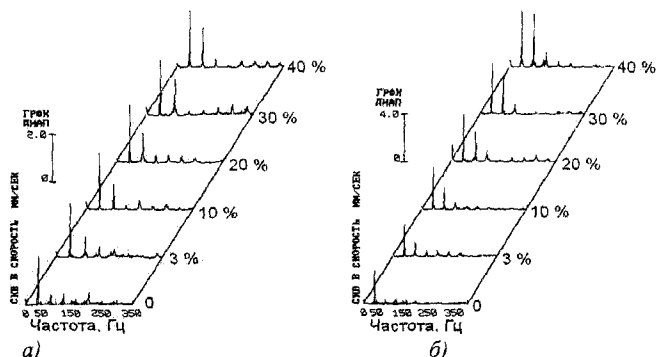


Рисунок 5 - Спектр виброскорости при поперечном надрезе в сечении Б: а) в горизонтальном направлении; б) в вертикальном направлении

Помочь решению данной проблемы может более подробное изучение модальных характеристик системы, так как одним из характерных признаков состояния конструктивного элемента является его собственная частота колебаний. Известно, что появление какого-либо дефекта, нарушение целостности конструкции приводит к изменению ее собственных частот. Данное явление имеет место и проявляется более интенсивно только на тех собственных частотах, кривизна формы мод которых совпадает с местоположением дефекта [3, 9]. Роторная система с поперечной трещиной не является исключением. Следовательно, используя данное свойство, посредством мониторинга АЧХ системы в области собственных частот появляется возможность определения местоположения усталостных трещин. Поэтому на следующем этапе были проведены исследования по определению модальных характеристик роторной системы и изучению влияния местоположения и глубины поперечной трещины на характер их изменения.

Моды колебаний определялись на основе модального анализа в конечно-элементном ПК ANSYS. При создании расчетной КЭМ (рисунок 6) использовался шестигранный двенадцатиузловой элемент 2-го порядка SOLID95. Подшипниковые опоры моделировались при помощи четырех пружинно-демпферных элементов COMBIN14.



Рисунок 6 – КЭМ роторной системы

Первоначально были определены модальные характеристики бездефектной системы, далее - с учетом наличия трещиноподобного дефекта в сечении А и Б. Результаты расчетов представлены на рисунке 7. Анализировались значения собственных частот, находящихся в диапазоне до 3000 Гц, соответствующему разрешению виброизмерительной аппаратуры.

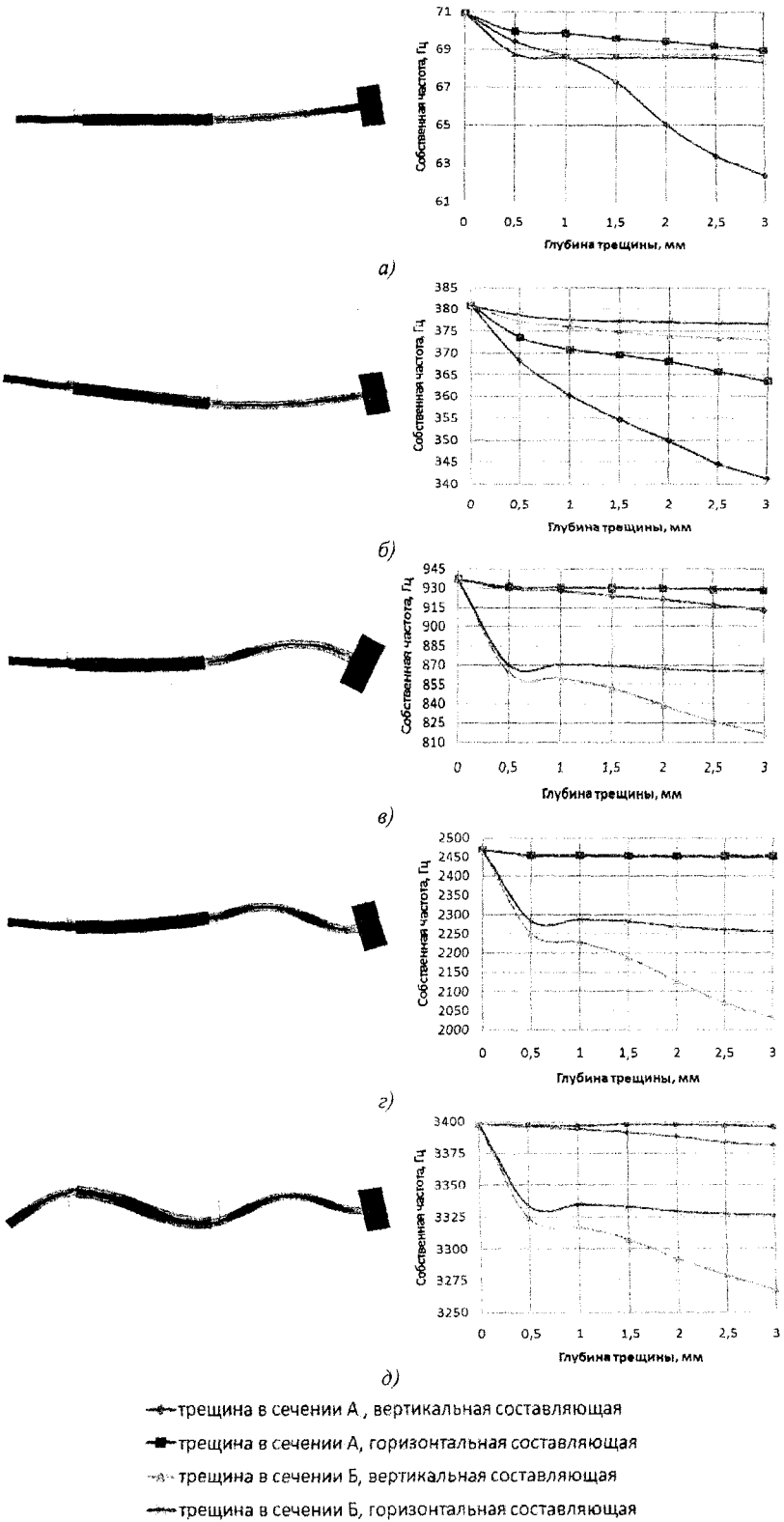


Рисунок 7 – Зависимость собственных частот колебаний от местоположения и глубины трещиноподобного дефекта:

а) вторая; б) третья; в) четвертая; г) восьмая; д) девятая

В результате расчетов было выявлено, что при наличии трещиноподобного дефекта в сечении А происходит значительное изменение величин собственных частот второй и третьей изгибных мод колебаний, а трещиноподобного дефекта в сечении Б – четвертой, восьмой и девятой. В свою очередь, пятая и шестая изгибные моды колебаний слабо реагируют на наличие дефекта, так как форма колебаний в месте локации трещины имеет малое перемещение. Ассиметрия жесткости роторной системы приводит к разнице величины изгибной собственной частоты в горизонтальном и вертикальном направлении. Соответственно, в спектре вибрационного сигнала будет происходить появление новых компонент в окрестности собственных частот.

Анализ результатов расчетов модальных характеристик показал, что о наличии и степени развития поперечной трещины свидетельствуют величина изменения собственных частот по сравнению с эталонными (частоты, характерные бездефектой модели) и разница собственных частот в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. О местоположении дефекта можно судить по тому какие собственные частоты претерпевают наибольшие изменения.

Поэтому на следующем этапе были проанализированы спектры СКЗ виброускорений, т.к. данная характеристика является наиболее чувствительной в средне и высокочастотной области по сравнению с виброперемещением и виброскоростью. Исследовался диапазон от нуля до 3000 Гц (рисунок 8, 9).

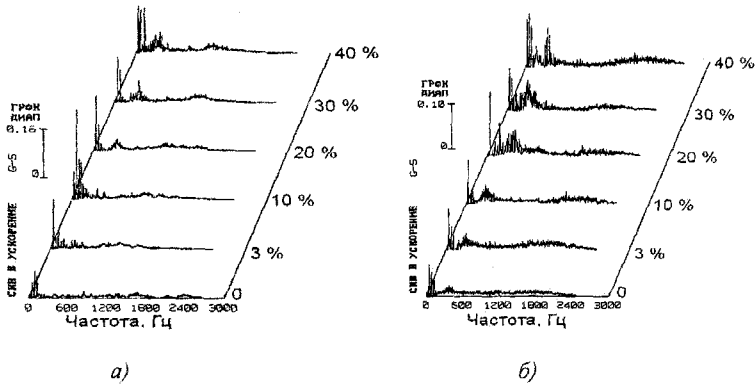


Рисунок 8 - Спектр виброускорения при поперечном надрезе в сечении А: а) в горизонтальном направлении; б) в вертикальном направлении

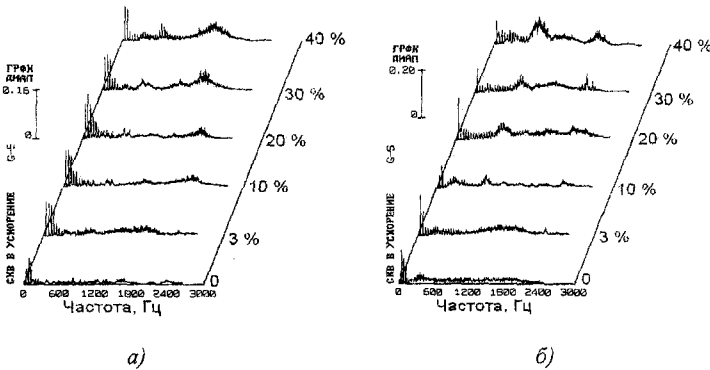


Рисунок 9 - Спектр виброускорения при поперечном надрезе в сечении Б: а) в горизонтальном направлении; б) в вертикальном направлении

Исходя из полученных данных видно, что при наличии трещиноподобного дефекта в сечении А наблюдается повышение мощности спектра во всем диапазоне по сравнению с

бездефектным состоянием. Наибольшее изменение спектр претерпевает в диапазоне от 300 до 400 Гц, что соответствует области третьей собственной частоты. Также происходит незначительное повышение интенсивности шумовой компоненты спектра в области других собственных частот. С ростом глубины трещиноподобного дефекта происходит смещение пика зоны повышенной интенсивности в сторону уменьшения, что соответствует теоретическим и литературным данным. В вертикальном направлении пик с максимальной интенсивностью сместился с 398 Гц (бездефектное состояние) до 326 Гц (глубина надреза 40 % от поперечного сечения вала), для горизонтального – с 390 до 340 Гц. Аналогичная картина наблюдается при расположении трещиноподобного дефекта в сечении Б (рисунок 9). Только в этом случае более интенсивное изменение уровня мощности спектра СКЗ виброускорения происходит в диапазонах от 750 до 900 Гц и от 1900 до 2400 Гц, что, судя по проведенному модальному анализу, соответствует области четвертой и восьмой модам колебаний (рисунок 7, в, г).

Таким образом, для обеспечения промышленной безопасности при эксплуатации насосных агрегатов на опасных производственных объектах предлагается использовать методику выявления наличия, размера и местоположения усталостных трещин валов их роторов, включающую следующие этапы:

- расчет критической глубины усталостной трещины на валу ротора насосного агрегата при условии наличия микродефекта под действием эксплуатационных нагрузок, используя зависимости механики разрушения и конечно-элементные программные комплексы, например, ANSYS;
- модальный анализ роторной системы в бездефектном состоянии и при наличии трещиноподобного дефекта с целью определения ее собственных частот и форм колебаний, а также влияния размера и местоположения дефекта на характер их изменения;
- анализ спектров СКЗ виброскорости в низкочастотной области для выявления общих признаков, характерных наличию поперечной трещины, а также анализ спектров СКЗ виброускорения в средне и высокочастотной диапазоне в области собственных частот с целью определения местоположения и степени развития дефекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Гумеров А.Г., Гумеров Р.С., Акбердин А.М. Диагностика оборудования нефтеперекачивающих станций. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 347 с.
- 2 Костюк А. Г., Петрунин С. В. Влияние поперечной трещины на вибрацию двухопорного ротора // Труды МЭИ. – 1993. - Вып. 663. – С. 109-117.
- 3 Шульженко Г. Н. Определение признака развитой трещины при изгибных колебаниях вращающегося ротора // Проблемы машиностроения. – 1990. – Т. 34. – С. 7-13.
- 4 Зиле А. З., Израилев Ю. Л., Руденко М. Н. Особенности вибрационного проявления трещин ротора турбогенератора // Электрические станции. - 1985. - № 4. - С. 26-29.
- 5 Mayes J.W., Davies W.G. Analysis of the response of a multi-rotor-bearing system containing a transverse crack in a rotor // Trans. ASME: J. Vibr. Acoust. Stress and Reliab. - 1984. - V. 106. - P. 139-145.
- 6 Sinou J.J. Detection of cracks in rotor based on 2 and 3 super-harmonic frequency components and the crack-unbalance interactions // Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2008. - № 13. – P. 2024-2040/
- 7 Imam I., Azzaro S.H., Bankert R.J., Scheibel J. Development of an on-line rotor detection and monitoring system // Transaction of the ASME: J. of Vibration, Acoustic, Stress, and Reliability in Desing. – 1989. – V. 111. – P. 241-250.
- 8 Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. М.: ЛЕНАНД, 2008. – 456 с.
- 9 Генкин М.Д. Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

Закиричная Марина Михайловна

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

Доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств»

Тел. 8(347) 240-58-99

E-mail: zakmarina@mail.ru

Халитов Тимур Флюрович

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

Аспирант, ассистент кафедры «Машины и аппараты химических производств»

Тел. 8(347) 240-58-99

E-mail: timakhalitov@gmail.com

Уважаемые авторы!

Просим Вас ознакомиться с основными требованиями к оформлению научных статей.

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 3 до 7 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.

- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).

- В одном сборнике может быть опубликована только одна статья одного автора, включая соавторство.

- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и сверху – 2 см.

- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.

- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языках.

- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.

- В тексте статьи желательно:

- не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;

- не применять произвольные словообразования;

- не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.

- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.

- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

Рисунок 1 – Текст подписи

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.ostu.ru.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Адрес учредителя:

Орловский государственный технический университет
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 43-48-90
www.ostu.ru
E-mail: admin@ostu.ru

Технический редактор А.А. Алисов
Компьютерная верстка А.В. Морозова

Подписано в печать _____.____.2010 г.

Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 7,7.

Тираж 600 экз.

Заказ № 16/10 п.2

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.