

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тверской государственный технический университет

*Посвящается 90-летию
Тверского государственного
технического университета*

**МЕХАНИКА И ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ
И В КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Межвузовский сборник научных трудов
Выпуск 6

Рецензируемое издание

Тверь 2013

УДК 621.891
ББК 22.37я43

Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. Вып. 6. Тверь: ТвГТУ, 2013. 148 с.

В сборник включены статьи теоретического и прикладного характера, посвященные широкому кругу вопросов, касающихся физических, химических, механических процессов на поверхности и в контакте твердых тел, а также различных деталей машиностроительных и энергетических машин и оборудования. Представлены работы, в которых рассматриваются вопросы повышения качества и надежности машиностроительного и электротехнического оборудования, физика и механика контактных явлений, физические аспекты материаловедения, а также более общие вопросы технологии машиностроения.

Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов, студентов.

Сборник подготовлен на кафедре прикладной физики Тверского государственного технического университета.

Редакционная коллегия:

доктор техн. наук профессор А.Н. Болотов;
доктор техн. наук профессор Г.Б. Бурдо;
академик РАН доктор физ.-мат. наук профессор И.Г. Горячева;
доктор техн. наук профессор В.В. Измайлов (отв. редактор);
доктор техн. наук профессор В.В. Мешков;
канд. техн. наук доцент М.В. Новоселова (отв. секретарь).

Рецензенты: зав. кафедрой общей физики ТвГУ, доктор хим. Наук, профессор Орлов Ю.Д.; доцент кафедры общей физики ТвГУ кандидат физ.-мат. наук Новоселов А.Р.

ISBN 978-5-7995-0663-6

© Тверской государственный
технический университет, 2013

ПРЕДИСЛОВИЕ

Тематика сборника отражает основные направления научных исследований сотрудников Тверского государственного технического университета в области механики и физики контактного взаимодействия, триботехники, материаловедения и технологии машиностроения. Представлены также работы российских и зарубежных ученых по аналогичной тематике. Статьи в сборнике расположены по тематическим разделам.

Раздел «Механика контактного взаимодействия» включает статьи, посвященные актуальным научным и практическим вопросам теории контакта шероховатых поверхностей деталей машин и технических узлов.

В раздел «Триботехника» включены статьи, посвященные широкому кругу проблем трения и изнашивания. Представлены оригинальные результаты по повышению износостойкости конкретных триботехнических узлов различного назначения.

В разделе «Проектирование и эксплуатация деталей машин» представлены результаты исследований технологических процессов в производстве машиностроительных изделий и их практическое применение.

В разделе «Материаловедение конструкционных материалов» рассмотрены материаловедческие аспекты создания конструкционных материалов с повышенными эксплуатационными свойствами для технологического оборудования.

Статьи в разделах сборника размещены в порядке их поступления в редакцию.

Публикуемые материалы предназначены для научных работников и специалистов в области проектирования и эксплуатации современного машиностроительного, энергетического, транспортного оборудования, а также для докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов машиностроительных, энергетических и приборостроительных специальностей.

УДК 531.43

В.В. Измайлов, Д.А. Левыкин
Тверской государственной технической университет**ЖЕСТКОСТЬ КОНТАКТА И ЕГО ФРЕТТИНГОСТОЙКОСТЬ**

Показано, что тангенциальная жесткость (податливость) контакта шероховатых поверхностей может быть использована для построения карт механизмов фреттинг-изнашивания. Предложен безразмерный критерий для описания процесса фреттинг-изнашивания, включающий амплитуду колебаний, податливость контакта, коэффициент трения и нормальную нагрузку. Для оценки податливости контакта используется численная модель контактного соединения. Показана также возможность непосредственного использования численной модели контакта для построения карт механизмов фреттинг-изнашивания.

Ключевые слова: контакт шероховатых поверхностей, моделирование, фреттинг-изнашивание, контактная податливость, карты механизмов фреттинг-изнашивания.

CONTACT STIFFNESS AND FRETTING RESISTANCE

It is shown that contact stiffness (compliance) may be used for the construction of fretting mechanism maps. The dimensionless criterion has been proposed for fretting wear description. The above mentioned criterion involves oscillation amplitude, contact compliance, friction coefficient and normal load. Contact compliance may be estimated by means of numerical modeling of a contact joint. As is shown, fretting mechanism maps may be directly constructed by means of a numerical modeling of a contact joint.

Key words: rough surfaces contact, modeling, fretting wear, contact compliance, fretting mechanism maps.

Изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии, или фреттинг-изнашивание и фреттинг-коррозия, являются достаточно распространенными и достаточно опасными явлениями, сопровождающими работу многих контактных соединений в машиностроении, энергетике и на транспорте. К таким соединениям относятся подшипники качения, соединения с натягом, заклепочные и резьбовые соединения, замковые соединения, электрические контакты и другие соединения, испытывающие в процессе эксплуатации малые тангенциальные смещения в результате динамических нагрузок, вибраций, термических деформаций и иных причин. В связи с распространенностью и опасностью последствий фреттинг-изнашивания и фреттинг-коррозии повышение стойкости контактных соединений к этим видам изнашивания весьма актуально.

Карты механизмов фреттинг-изнашивания. Вследствие сложной природы явления и многочисленности влияющих факторов, изучению данных видов изнашивания посвящено много работ, выполненных начиная с 20-х годов XX века [1–4 и др.]. В работах [5, 6] предложено описывать фреттинг-изнашивание с помощью так называемых карт механизмов фрет-

тинга. Типичная карта механизмов фреттинга [7] представляет собой графические зависимости между нормальной нагрузкой, приложенной к контакту, и амплитудой тангенциального смещения, которые разделяют области, соответствующие основным механизмам процесса фреттинг-изнашивания (рис. 1).



Рис. 1. Типичная карта механизмов фреттинг-изнашивания [7]

на всех единичных площадках контакта неровностей контактирующих поверхностей, т.е. фактически эта область соответствует так называемому предварительному смещению контакта. Между областями 1 и 2 располагается область 3 – область частичного проскальзывания.

Различным областям, как уже отмечалось, соответствуют различные физические механизмы, контролирующие процесс фреттинг-изнашивания. В области сцепления (область 1) износ практически отсутствует на протяжении миллионов циклов деформации контакта. В области частичного проскальзывания (область 3) образуются усталостные трещины на площадках контакта, и в результате многократных деформаций происходит



Рис. 2. Схематическая зависимость срока службы контактного соединения от амплитуды тангенциального смещения [8]

отделение частиц износа. В области существенного проскальзывания (область 2) образование усталостных трещин уже не играет главенствующей роли, а изнашивание носит обычный для трения скольжения характер.

С практической точки зрения, знание механизма фреттинг-изнашивания представляет интерес для оценки срока службы контактного соединения. На рис. 2 схематически изображена зависимость срока

службы контактного соединения от амплитуды перемещений с указанием механизмов фреттинг-изнашивания [8]. Наименьший срок службы ожидается у соединений, работающих в условиях перехода от частичного к существенному проскальзыванию. Этот факт можно объяснить тем, что на этом участке диапазона относительных тангенциальных смещений образование частиц износа происходит достаточно интенсивно, но удаление их из области контакта еще затруднено. Располагая картой механизмов фреттинг-изнашивания для данного соединения, можно выбрать эксплуатационные режимы (в первую очередь, нормальную нагрузку), уводящие соединение из нежелательной области.

Критерии механизмов изнашивания. В работе [9] для характеристики механизма фреттинг-изнашивания предлагается безразмерный критерий

$$D = \frac{A_{\tau}}{j_{\tau} N}, \quad (1)$$

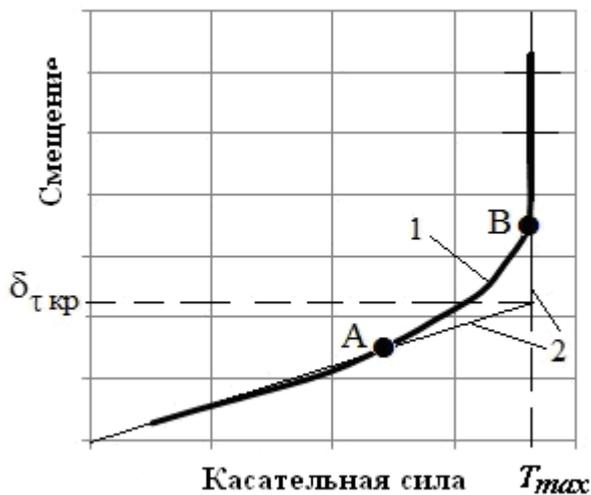


Рис. 3. Типичная зависимость тангенциального смещения контактирующих поверхностей от сдвигающей силы (кривая 1) и ее аппроксимация (ломаная линия 2). Точка А – переход от обратимой деформации к необратимой, точка В – переход к установившемуся скольжению

[10] и моделирования контактного соединения [11] зависимость касательных деформаций плоского стыка шероховатых поверхностей от сдвигающей нагрузки можно аппроксимировать ломаной линией (рис. 3).

Из определения касательной податливости следует очевидное равенство:

$$\delta_{\tau \text{кр}} = j_{\tau} T_{\text{max}} = j_{\tau} f_c N,$$

где f_c – коэффициент трения. Отсюда получаем безразмерный критерий

где A_{τ} – амплитуда касательных перемещений, обусловленная конструкцией соединения или эксплуатационными факторами; j_{τ} – касательная податливость стыка; N – сжимающая нагрузка. Режимам фреттинг-изнашивания, согласно работе [9], соответствует область значений $D < 10$, при $D > 10$ имеет место обычное трение скольжения. Область существенного проскальзывания соответствует диапазону значений $0,8 < D < 10$; область частичного проскальзывания – $D < 0,6$.

В обоснование такого подхода можно привести следующие рассуждения. На основании экспериментальных исследований

$$D = \frac{A_{\tau}}{j_{\tau} f_c N}, \quad (2)$$

который отличается от предложенного в работе [9] (формула (1) наличием коэффициента трения в знаменателе.

На основании рис. 3 примем, что значения $D > 1,5$ соответствуют режиму существенного проскальзывания. Результаты моделирования [11] и экспериментальные исследования [10] показывают также, что обратимая касательная деформация (линейный участок зависимости смещения от касательной силы до точки А на рис. 3) соответствует примерно значению $\delta_{\tau} < 0,5\delta_{\text{кр}}$. На этом основании примем, что режиму сцепления соответствуют значения критерия $D < 0,5$. Значения $0,5 < D < 1,5$ соответствуют режиму частичного проскальзывания.

Таким образом, зная касательную податливость контакта и коэффициент трения, можно построить карты режимов фреттинг-изнашивания, аналогичные рис. 1, с указанием областей, соответствующих тому или иному механизму изнашивания. Примеры представлены на рис. 4. Для расчета контактной податливости стыка использована математическая модель дискретного контакта шероховатых поверхностей [11].

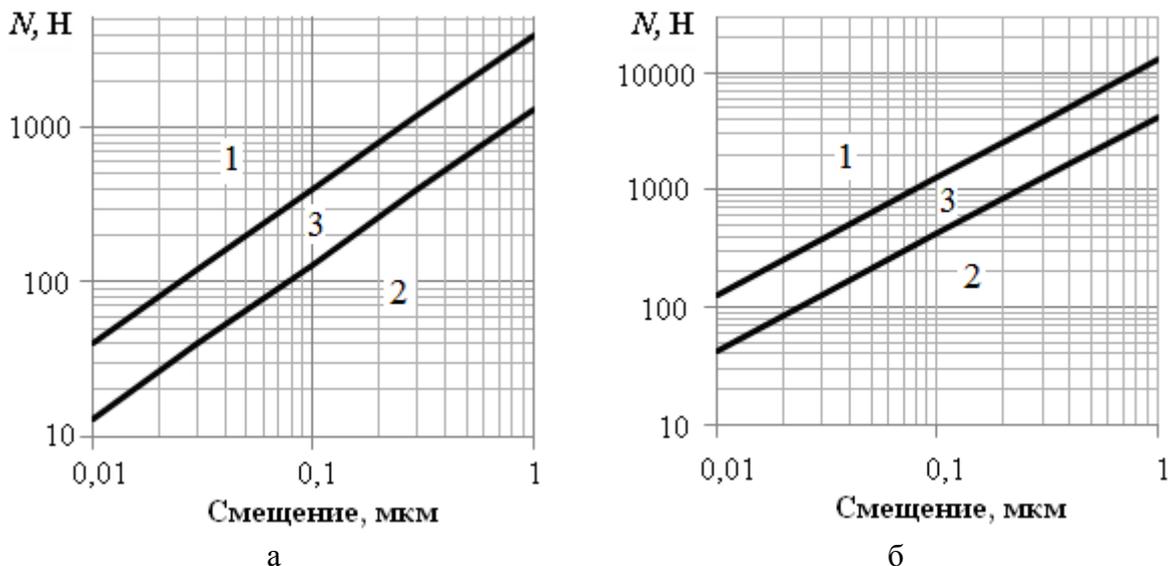


Рис. 4. Карты механизмов фреттинг-изнашивания:

а – поверхность после шлифования, $R_p = 2,4$ мкм; б – поверхность после поверхностного пластического деформирования; $R_p = 3,2$ мкм. Коэффициент трения $f_c = 0,25$.

1 – область сцепления; 2 – область существенного проскальзывания;

3 – область частичного проскальзывания

Моделирование контакта и карты режимов фреттинг-изнашивания. Возможности математического моделирования контакта технических поверхностей [11] позволяют несколько иначе подойти к построению карт режимов фреттинг-изнашивания. Обратимся снова к рис. 3. Будем считать точку А на графике $\delta_{\tau}(T)$ соответствующей переходу от

упругого (обратимого) смещения контактирующих поверхностей к их частичному проскальзыванию, а точку B – переходу к существенному проскальзыванию. Построив с помощью упомянутой математической модели для поверхностей с заданными параметрами топографии и механическими свойствами материалов серию зависимостей $\delta_\tau(T)$ для набора значений нормальной (сжимающей) нагрузки N , определим для каждого значения N из этого набора значения смещений, соответствующих точкам A и B , т.е. переходу от сцепления к частичному проскальзыванию и от частичного проскальзывания к существенному. По этим данным можно построить карты механизмов фреттинг-изнашивания, подобные рис. 1, для данного контакта. Примеры приведены на рис. 5.

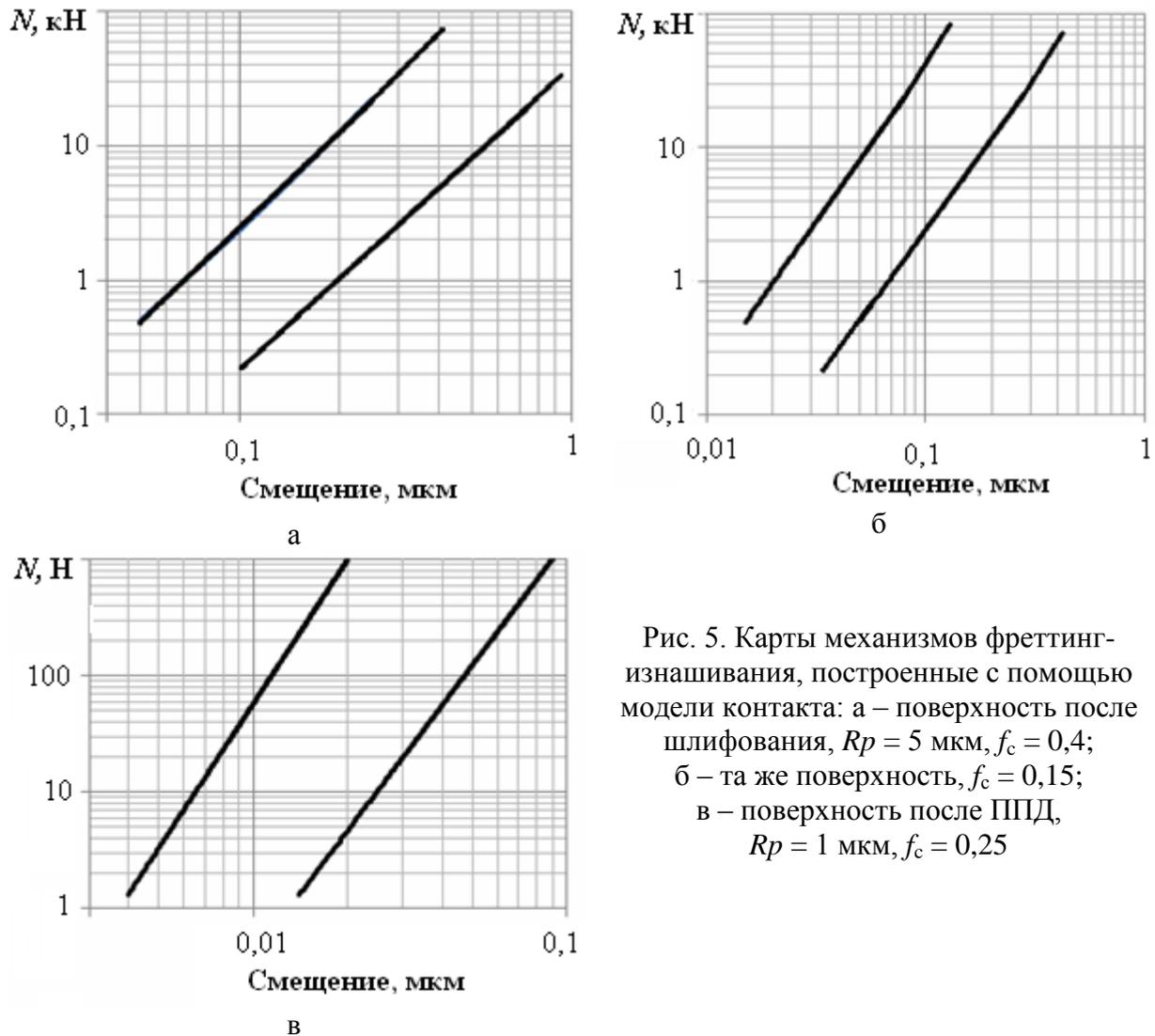


Рис. 5. Карты механизмов фреттинг-изнашивания, построенные с помощью модели контакта: а – поверхность после шлифования, $R_p = 5$ мкм, $f_c = 0,4$; б – та же поверхность, $f_c = 0,15$; в – поверхность после ППД, $R_p = 1$ мкм, $f_c = 0,25$

Следует отметить, что полученные таким образом и представленные на рис. 5 карты несколько отличаются от карт, представленных на рис. 4. Зависимости $N(\delta_\tau)$, разграничивающие области различных механизмов из-

нашивания, на картах рис. 4 линейные (в соответствии с формулой (2)), тогда как на картах рис. 5 эти зависимости нелинейные.

Заключение. Математическое моделирование контактного соединения, нагруженного сжимающей и сдвигающей силами, позволяет построить так называемые карты механизмов фреттинг-изнашивания. С помощью подобных карт можно выбрать конструктивные и эксплуатационные факторы, способствующие повышению срока службы контактного соединения при малых тангенциальных перемещениях. Наименее желательны режимы работы соединения, соответствующие области частичного проскальзывания на карте режимов изнашивания. Интересно, что повысить срок службы контактного соединения в условиях фреттинг-изнашивания можно не только уменьшая контактную податливость соединения (т.е. увеличивая его жесткость), но и увеличивая податливость, если это допустимо по конструктивным и эксплуатационным соображениям.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 12-08-00159-а).

Библиографический список

1. Tomlinson, G.A. The rusting of steel surfaces in contact / G.A. Tomlinson // Proc. of the Royal Society. 1927. V. A115. P. 472-483.
2. Уотерхауз, Р.Б. Фреттинг-коррозия / Р.Б. Уотерхауз. Л.: Машиностроение, 1976. 272 с.
3. Голего, Н.А. Фреттинг-коррозия металлов / Н.А. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля. Киев: Техніка, 1974. 268 с.
4. Hills, D.A. Mechanics of Fretting fatigue / D.A. Hills, D. Nowell. Springer. 1994. 260 pp.
5. Vingsbo, O. On Fretting Maps / O. Vingsbo, S. Soderberg // Wear. 1988. V. 126. P. 131-147.
6. Vincent, L. Mechanisms and materials in fretting / L. Vincent, Y. Berthier, M.C. Dubourg, M. Godet // Wear. 1992. V. 153. P. 135-138.
7. Stachowiak, G.W. Engineering Tribology / G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor Elsevier. 2005. 802 pp.
8. Nowell, D. Recent developments in the understanding of fretting fatigue / D. Nowell, D. Dini, D.A. Hills // Engineering Fracture Mechanics. 2006. V. 73. P. 207-222.
9. Varenberg, M. Slip index: a new unified approach to fretting / M. Varenberg, I. Etsion, G. Halperin // Tribology Letters. 2004. V. 17. № 3. P. 569-573.
10. Левина, З.М. Контактная жесткость машин. / З.М. Левина, Д.Н. Решетов. М.: Машиностроение, 1971. 264 с.
11. Измайлов, В.В. Моделирование контактного взаимодействия шероховатых поверхностей в условиях тангенциальных микроперемещений / В.В. Измайлов, Д.А. Левыкин // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. № 4. С. 16-22.

УДК 621.892

С.Г. Докшанин
Сибирский федеральный университет**ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ДЛЯ СЛУЧАЯ КАЧЕНИЯ ТЕЛ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ**

В работе исследуется влияние силы трения на изменение напряженного состояния материала. Приводится анализ зависимости тангенциальных напряжений от коэффициента трения для роликового подшипника качения в случае трения качения с проскальзыванием.

Ключевые слова: усталостный износ, сила трения, площадка контакта, контактные напряжения, роликовый подшипник качения, касательные напряжения.

**EFFECT OF THE FRICTION COEFFICIENT ON THE DISTRIBUTION
OF THE TANGENTIAL STRESS IN THE CASE
OF THE ROLLING WITH SLIDING**

This paper investigates the influence of the friction force on the change of the state of stress of the material. The results concerning the dependence of a tangential stress on the friction coefficient for the rolling bearings in the case of combined rolling and sliding friction are presented.

Key words: fatigue wear, friction force, contact area, contact stress, rolling bearing, tangential stress.

Оценка влияния контактных напряжений на долговечность не возможна без учета такого фактора, как возникающая при взаимодействии тел сила трения. Максимальные касательные напряжения τ_{max} , связанные с её увеличением, повышают значения нормальных напряжений на площадке контакта, что приводит к появлению усталостного изнашивания поверхностей. При этом скорость развития усталостных трещин зависит от напряженного состояния и вида возникающих деформаций поверхностных и приповерхностных слоев, свойств смазочного материала и толщины смазочной пленки, появлением микропластических деформаций при упругом контактировании деталей. Характерному изнашиванию подвергаются поверхности деталей узлов, работающие в режиме качения с проскальзыванием [1, 2].

Исследования напряженного состояния контактирующих деталей подшипника качения и оценка величины касательных напряжений вдоль площадки контакта и их распределения по глубине материала колец выполнялись с помощью программного комплекса *ELCUT* на основе компьютерной модели контакта цилиндрического ролика с дорожкой качения при наличии сил трения. Для компьютерной модели рассматривался контакт, возникающий при качении с проскальзыванием ролика по упругому основанию в виде внутреннего кольца (рис. 1).

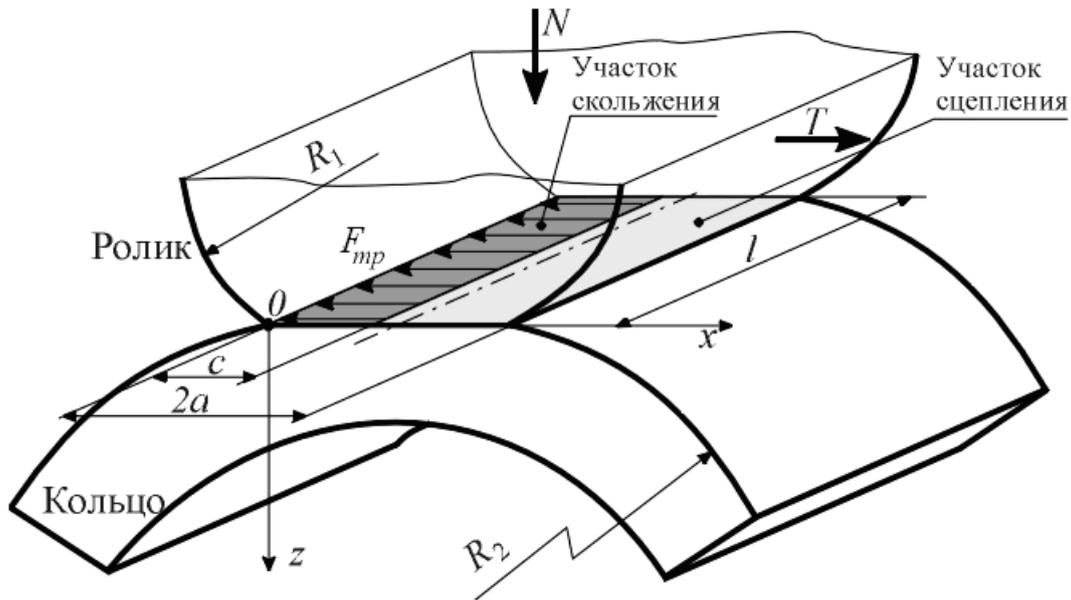


Рис. 1. Расчетная схема модели контакта ролика с дорожкой качения

Расчетная схема состоит из двух блоков – ролика и дорожки качения внутреннего кольца. Каждый блок разбивается на ребра и вершины, к которым прикладываются действующие точечные или поверхностные нагрузки.

Основываясь на положениях герцевской теории контакта и теории упруго-гидродинамического трения, а также учитывая условия работы роликовых подшипников качения, рассматривалась задача о контакте тел качения в роликовом подшипнике для режима граничного трения. Контактные поверхности задавались между цилиндрическим роликом и поверхностью качения внутреннего кольца. В зоне контакта существует образованная упругими деформациями герцевская площадка прямоугольной формы ширины $2a$ и длины l , равной длине ролика. Площадка контакта делилась на два участка. Первый участок, расположенный на стороне набегания цилиндра, является зоной сцепления, другой участок – зоной, где имеет место скольжение между контактирующими поверхностями. Ширина участка скольжения, равная c , может быть определена из представленной формулы [3]:

$$\frac{c}{a} = 1 - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{1-2\nu}{f(2-2\nu)},$$

где a – полуширина площадки контакта, определенная по формулам Герца; f – коэффициент трения скольжения; ν – коэффициент Пуассона. Размер полуширины площадки при статическом контакте цилиндра с плоскостью рассчитывался по формуле [4]:

$$a = 0,798 \sqrt{2pR(\Theta_1 + \Theta_2)},$$

где R – радиус цилиндра; $\Theta_i = \frac{1-\nu_i^2}{E_i}$ – упругий коэффициент; E_i – модуль упругости материала; ν_i – коэффициент Пуассона.

Оценка изменения напряженного состояния на основе компьютерной модели выполнялась для роликового радиального подшипника типа 32206. Нормальная нагрузка изменялась от 1 до 2,5 кН при однонаправленном вращении внутреннего кольца подшипника с частотой 960 об/мин. Значения коэффициента трения взяты на основе экспериментальных данных, полученных при оценке смазочных свойств пластичных смазочных материалов. Исходным и основным расчётным напряжением принималось максимальное касательное напряжение τ_{\max} , действующее на некоторой глубине под поверхностью на оси z , нормальной к поверхности контакта.

При статическом сжатии упругих тел наличие дополнительной внешней тангенциальной силы, стремящейся сдвинуть контактируемые поверхности одну относительно другой, влияет как на размеры участка скольжения на площадке контакта в процессе сжатия, так и на глубину расположения под поверхностью участка с максимальными касательными напряжениями. Кроме того, происходит увеличение растягивающих касательных напряжения на задней стороне контакта, соответственно с их уменьшением на передней. Таким образом, присутствие силы трения перемещает точку, в которой касательные напряжения будут максимальными, к поверхности.

Касательные напряжения

$\tau, 10^8 \text{ Па}$

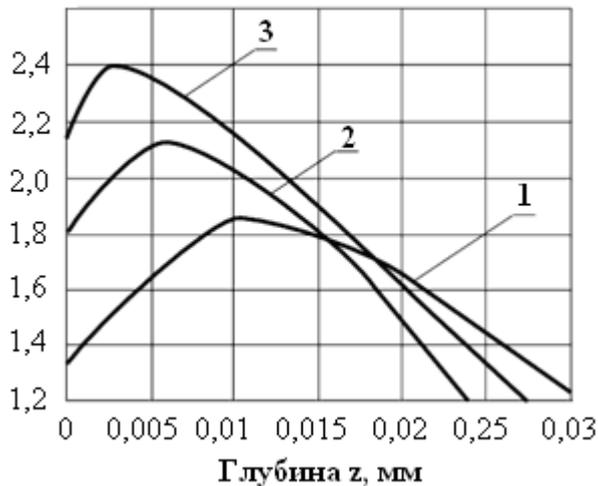


Рис. 2. Распределение касательных напряжений по глубине внутреннего кольца:
1 – при $f = 0,09$; 2 – при $f = 0,11$; 3 – при $f = 0,13$

Например, на рис. 2 представлены графики распределения касательных напряжений τ в зависимости от коэффициента трения f . Напряжения определялись по глубине материала внутреннего кольца в центре площадки контакта. Можно заметить, что при увеличении сил трения на участке скольжения уменьшается глубина, на которой располагается точка максимальных касательных напряжений, происходит ее приближение к поверхности в направлении действия силы трения.

Анализ напряженно-деформационного состояния контактирующих тел показывает, что при одновременном действии касательных и нормальных нагрузок наиболее значимыми для определения долговечности подшипников качения по критерию усталостного изнашивания являются не глубинные мак-

симальные касательные напряжения, а поверхностные напряжения на контуре контакта, непосредственно связанные с силами трения.

Максимальные касательные напряжения, связанные с увеличением силы трения, повышают значения нормальных напряжений на площадке контакта. Такой рост приводит к появлению усталостного изнашивания поверхностей. Если на участке скольжения выполняется закон трения Кулона – Амонтона, то касательные и нормальные нагрузки связаны зависимостью [5]:

$$\tau(x) = f \cdot \sigma(x),$$

где $\tau(x)$ – тангенциальные напряжения; $\sigma(x)$ – нормальные напряжения; f – коэффициент трения.

В случае проскальзывания тел качения усталостные разрушения деталей подшипника будут начинаться на поверхности. Чтобы решить данный вопрос и реализовать стабильную и продолжительную работу узлов с трением качения, можно применить новые смазочные материалы с высокими антифрикционными свойствами. Такие смазки модифицируют поверхностные слои контактирующих деталей в зоне трения, снижая контактные нагрузки, а, следовательно, и напряжения в материале [6]. Результаты применения модифицированных ультрадисперсными добавками смазочных материалов показали, что в случае снижения величины момента трения до 30% в подшипнике качения происходит понижение контактных напряжений на 18–20%.

Снижение силы трения на контакте будет менять форму образования усталостных трещин на глубинную, что увеличивает время эксплуатации подшипниковых опор до начала усталостного разрушения дорожек и тел качения подшипников. Установление степени влияния этих сил на усталостные процессы позволило бы разработать меры для повышения срока службы опор качения, работающих при значительных касательных нагрузках.

Библиографический список

1. Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность / Н.А. Махутов. В 2 ч. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2005. Ч. 1. 494 с.
2. Морозов, Е.М. Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. М.: Машиностроение, 1999. 544 с.
3. Галин, Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости / Л.А. Галин. М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1980. 304 с.
4. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
5. Пинегин, С.В. Трение качения в машинах и приборах / С.В. Пинегин. М.: Машиностроение, 1976. 264 с.
6. Терентьев, В.Ф. Трибонадежность подшипниковых узлов в присутствии модифицированных смазочных композиций / В.Ф. Терентьев, Н.В. Еркаев, С.Г. Докшанин. Новосибирск: Изд-во «Наука» СО РАН, 2003. 142 с.

УДК 621.891

М.М. Матлин, А.И. Мозгунова, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин
Волгоградский государственный технический университет

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СООТНОШЕНИЯ ТВЕРДОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ НА КОНТАКТНУЮ ЖЁСТКОСТЬ

В работе предложен способ определения остаточной деформации при контакте сферического индентора и плоского контртела при условии близкой твердости их материалов.

Ключевые слова: контактная деформация, пластическая твердость, сплющивание, внедрение.

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF PARTS HARDNESS RATIO ON THE CONTACT STIFFNESS

The paper proposes the method for determining the residual deformation in contact of a spherical indenter and flat counterbody in the case of close hardness of materials.

Keywords: contact deformation, plastic hardness, flattening, indentation.

Контактное взаимодействие деталей машин является одним из наиболее распространенных видов нагружения, встречающихся в машиностроении. Этот вид нагружения присутствует, например, в соединениях с натягом и т.д. При этом аналитических зависимостей, позволяющих определить остаточную деформацию, используя характеристики контактирующих деталей, по-прежнему не существует. Этим, в частности, объясняется необходимость разработки новых методов расчетного определения контактной жесткости деталей машин.

Отметим, что в настоящей работе для описания закономерностей упругопластического контакта использовано понятие контактного модуля упрочнения материала – пластической твердости $HД$ (ГОСТ 18835-73) [1]. Число пластической твердости $HД$ базируется на впервые экспериментально установленной М.С. Дроздом линейной зависимости между нагрузкой F на сферический индентор с диаметром D и глубиной h остаточного отпечатка, справедливой в диапазоне $h/D=0,01\dots 0,08$. Впоследствии эта линейная зависимость была обоснована аналитически на базе деформационной теории пластичности и метода переменных параметров упругости. В указанном выше диапазоне глубин h значение пластической твердости не зависит от величины нагрузки F и диаметра D сферического индентора (то есть не зависит от условий испытаний на твердость) и, таким образом, является константой для данного материала. В таблице 1 показаны взаимосвязи пластической твердости $HД$ с другими числами твердости [2].

В работе рассматривается случай, когда твердости материалов, из которых изготовлены детали, отличаются менее чем в 2 раза. При этом одновременно происходит как внедрение индентора в контртело, так и его

сплющивание. Этот случай контакта достаточно часто встречается в технике. В рассматриваемом случае суммарная остаточная контактная деформация h_{Σ} состоит из двух частей: глубины остаточного отпечатка на поверхности плоской поверхности h и величины остаточного сплющивания h_c .

Таблица 1. Связь пластической твёрдости $HД$ с другими числами твёрдости

Числа твёрдости	Пластическая твёрдость $HД$, МПа
HRC_3 (при $HRC_3 \geq 32$)	$3,57^{10^4} \cdot HRC_3^{4,05} + 3353$
HRB	$88300/(130 - HRB)$
HB , МПа (при $HB \leq 4000$)	$0,468HB^{1,124}$
HV , МПа (при $HV 1000 \dots 9200$)	$0,5HV^{1,113}$

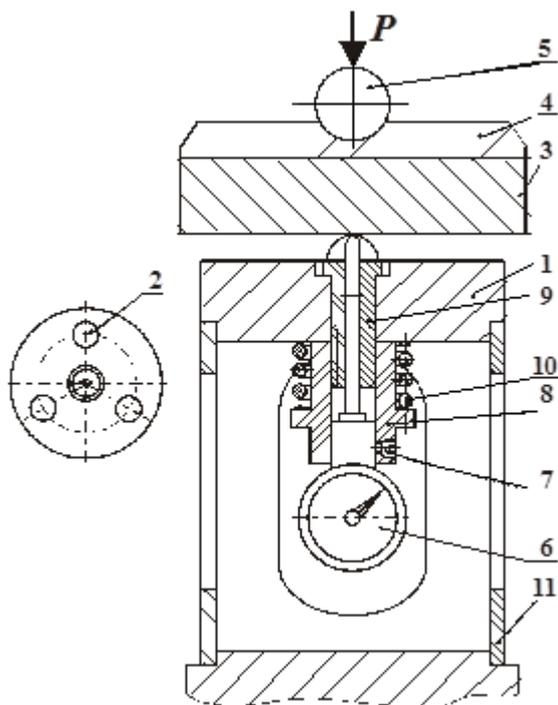


Схема приспособления для измерения сближения в контакте:

- 1 – основание;
- 2 – симметрично расположенные три стальных сферических сегмента;
- 3 – испытуемая деталь (образец);
- 4 – опорная шайба;
- 5 – центрирующий шарик;
- 6 – индикатор часового типа;
- 7 – винт; 8 – втулка;
- 9 – трубка для размещения индикатора;
- 10 – пружина; 11 – корпус приспособления

нагрузкой индикатором 6 часового типа (с ценой деления 1 мкм), который фиксировали винтом 7 во втулке 8. Во втулке 8 закрепляли на резьбе труб-

С целью определения суммарной остаточной деформации h_{Σ} были проведены экспериментальные исследования контакта сферического индентора с плоской плитой при различных соотношениях их твердостей ($0,5 \leq \frac{HД_{ш}}{HД} \leq 2$).

Схема устройства (которая аналогична прибору для измерения контактных деформаций, предложенному Н.Б. Демкиным) представлена на рисунке. На поверхности основания 1 симметрично размещали три стальных сферических сегмента 2 (изготовленных из стали ШХ 15 и термообработанных на твердости $HД_{ш}$ 2430 и 3680 МПа, высота сегмента равна радиусу сферы $R = 2,5$ мм). Твердость стальной детали 3 варьировали в диапазоне $HД$ 1600...9500 МПа (чтобы обеспечить различную величину отношения $HД_{ш}/HД$). Нагружение производили с помощью прессы Бринелля ТШ-2 ($P = 613 \dots 9810$ Н) через шайбу 4 и центрирующий шарик 5. Полное сближение α_y измеряли под

ку 9, внутри которой размещали шток индикатора; трубка с натягом, создаваемым пружиной 10, упиралась в кольцевой паз основания 1. Конструкция приспособления позволяет таким образом исключить из отсчета сближение опорной поверхности основания 1 и корпуса 11, а также свести к минимуму ошибку, обусловленную упругой деформацией основания 1. Для уменьшения ошибки, вносимой сближением в контакте опорной плоскости сферического сегмента 2 с основанием 1, их поверхности тщательно полировали и притирали друг к другу.

Результаты экспериментального исследования позволили установить, что h_{Σ} может быть представлена в виде функции следующих факторов: приведённой пластической твёрдости $HД_{np}$ материала индентора и контртела, радиуса сферического индентора R , а также эффективной контактной нагрузки $(F - F_0)$.

Приняв в качестве основных единицы силы и длины, в соответствии с теорией размерности [3], из четырёх переменных параметров можно составить два безразмерных комплекса: h_{Σ} / R и $\frac{(F - F_0)}{HД_{np} \cdot R^2}$, первый из которых имеет физический смысл относительной остаточной деформации, а второй представляет собой отношение эффективной степени нагружения $(F - F_0) / R^2$ к приведённой твёрдости $HД_{np}$.

Функциональную связь между комплексами искали в виде

$$h_{\Sigma} = a \cdot R \cdot \left(\frac{F - F_0}{HД_{np} \cdot R^2} \right)^b, \quad (1)$$

где R – радиус индентора; F_0 – нагрузка на индентор, соответствующая появлению остаточной деформации в центре контакта; F – нагрузка на индентор; a и b – коэффициенты, зависящие от соотношения твердостей индентора и контртела $HД_{ш}/HД$, $HД_{np}$ – приведенная твердость:

$$HД_{np} = \frac{1,5 \cdot HД_{ш} \cdot HД}{HД_{ш} + HД}. \quad (2)$$

Коэффициенты a и b определены по результатам описанных выше экспериментов, что позволило выявить зависимость этих коэффициентов от соотношения твердостей индентора и контртела $HД_{ш}/HД$:

$$a = \frac{0,057}{(HД_{ш}/HД)^{1,72}} + 0,142, \quad b = 1,306 - 0,153 \cdot \left(\frac{HД_{ш}}{HД} \right).$$

Надо отметить, что коэффициенты a и b не зависят от упругих свойств и твёрдости материала, а также от геометрических параметров деформируемых поверхностей.

Отметим, что для случаев внедрения или сплющивания формула (2) преобразуется к виду: $HД_{np} = HД$ или $HД_{np} = HД_{ш}$. При этом, когда твердость индентора и контртела отличаются в 2 раза, формула (1) превраща-

ется в известные формулы для расчёта остаточной деформации при «чистом» внедрении [1]

$$h_{\Sigma} = 0,159 \cdot R \cdot \left(\frac{F - F_0}{HД \cdot R^2} \right)$$

и «чистом» сплющивании [2]

$$h_{\Sigma} = 0,33 \cdot R \cdot \left(\frac{F - F_0}{HД_{ш} \cdot R^2} \right)^{1,23}$$

В таблице 2 сопоставлены значения относительной остаточной деформации, полученные из эксперимента и по формуле (1). Отметим, что разброс значений h_{Σ}/R имеет двусторонний характер, а расхождение теоретических значений с экспериментальными в большинстве случаев находится в пределах 5÷10%.

Таким образом, полученные зависимости позволяют расчётным путём определять величину суммарной остаточной деформации в случае контакта сферического индентора и плоского контртела, изготовленных из материалов близкой твердости, что позволяет вычислять значения контактной жесткости деталей машин.

Таблица 2. Сравнение теоретических h_{Σ}/R и экспериментальных $(h_{\Sigma}/R)_{\text{э}}$ значений относительной остаточной деформации

$F/(HД_{\text{пр}} * R^2)$	$HД_{ш}/HД = 2$			$HД_{ш}/HД = 1,27$		
	Расчёт	Опыт	$\left(\frac{h_{\Sigma}}{R}\right) / \left(\frac{h_{\Sigma}}{R}\right)_{\text{э}}$	Расчёт	Опыт	$\left(\frac{h_{\Sigma}}{R}\right) / \left(\frac{h_{\Sigma}}{R}\right)_{\text{э}}$
0,05	0,0079	0,0075	1,060	0,0064	0,0069	0,94
0,10	0,0159	0,0150	1,060	0,0139	0,0137	1,02
0,15	0,0238	0,0244	0,977	0,0219	0,0206	1,06
0,20	0,0318	0,0312	1,019	0,0301	0,0316	0,95
0,25	0,0397	0,0422	0,942	0,0386	0,0378	1,02
0,30	0,0477	0,0533	0,895	0,0473	0,0468	1,01
0,40	0,0636	0,0610	1,043	0,0650	0,0687	0,95
0,50	0,0795	0,0865	0,919	0,0833	0,0906	0,92
0,60	0,0954	0,1021	0,934	0,1020	0,1070	0,95

$F/(HД_{\text{пр}} * R^2)$	$HД_{ш}/HД = 0,96$			$HД_{ш}/HД = 0,76$		
	Расчёт	Опыт	$\left(\frac{h_{\Sigma}}{R}\right) / \left(\frac{h_{\Sigma}}{R}\right)_{\text{э}}$	Расчёт	Опыт	$\left(\frac{h_{\Sigma}}{R}\right) / \left(\frac{h_{\Sigma}}{R}\right)_{\text{э}}$
0,05	0,0062	0,0059	1,051	0,0065	0,0054	1,20
0,10	0,0140	0,0120	1,167	0,0150	0,0135	1,11
0,15	0,0224	0,0228	0,982	0,0243	0,0224	1,08
0,20	0,0313	0,0307	1,020	0,0343	0,0298	1,15
0,25	0,0406	0,0406	1,000	0,0447	0,0442	1,01
0,30	0,0502	0,0489	1,027	0,0556	0,0576	0,97
0,40	0,0701	0,0677	1,035	0,0783	0,0727	1,08
0,50	0,0908	0,0935	0,971	0,1021	0,0965	1,06
0,60	0,1122	0,1229	0,913	0,1268	0,1348	0,94

Библиографический список

1. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
2. Матлин, М.М. Закономерности упругопластического контакта в задачах поверхностного пластического деформирования / М.М. Матлин, С.Л. Лебский, А.Н. Мозгунова. М.: Машиностроение-1, 2007. 218 с.
3. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. М.: Наука, 1965. 388 с.

УДК 531.43

Р.А. Секретарев
Тверской государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Описана компьютерная математическая модель контакта шероховатых поверхностей. Изложены теоретические предпосылки, лежащие в основе разработанной модели. Представлены полученные в результате моделирования характеристики контакта технических поверхностей.

Ключевые слова: математическая модель, контакт шероховатых поверхностей, упругий контакт, упругопластический контакт.

THE MATHEMATICAL MODEL OF A DISCRETE CONTACT OF ENGINEERING SURFACES

The mathematical computer model of a contact of rough surfaces has been described. The theoretical backgrounds of the worked out model have been stated. Some contact characteristics are presented as a result of contact modeling.

Key words: mathematical model, rough surfaces contact, elastic contact, elastoplastic contact.

Эксплуатационные характеристики деталей машин в большой степени определяются свойствами контакта сопряженных поверхностей. В общем случае контакт реальных поверхностей является дискретным, и касание выступов происходит только на отдельных площадках образующих фактическую площадь контакта. Процессы трения и изнашивания происходят именно на этой площади и зависят не только от свойств металла, но и от давления на этой площади, поскольку величина фактического давления определяет разрушение поверхностных пленок и возникновение адгезионных связей на контакте. Поэтому необходимо иметь методики расчета характеристик контакта, позволяющих оценивать его эксплуатационные свойства.

Расчет характеристик контакта является сложной инженерно-технической задачей, для решения которой в рамках различных подходов были разработаны аналитические методы, основанные на модельном пред-

ставлении шероховатой поверхности совокупностью выступов в виде тел правильной геометрической формы (сферических сегментов, цилиндров, пирамид и эллипсоидов). Наиболее универсальными моделями, пригодными для расчетов деформации контакта, фактической площади контакта, коэффициента трения и интенсивности изнашивания, являются сферическая или эллиптическая модели выступов шероховатости. В таких аналитических моделях шероховатая поверхность представляется совокупностью сферических сегментов с одинаковыми для всех выступов радиусами закругления вершин [1, 2]. Описание и сравнение подходов, использующих модели выступов в виде сферических сегментов приведено в работе [3]. Уточнение моделей, связанное с учетом распределения выступов, как по высотам, так и по радиусам закругления вершин, приводит к сложным аналитическим выражениям, содержащим интегралы, которые не выражаются в элементарных функциях и могут быть рассчитаны только численно.

Современные средства вычислительной техники позволяют использовать для расчета характеристик контакта численную (компьютерную) модель, учитывающую распределение выступов шероховатости не только по высотам, но и радиусам закругления вершин. Такая модель позволяет более точно учесть особенности контактирования каждого выступа по сравнению с аналитическим расчетом, связанным с усреднением характеристик контакта единичных выступов.

В отличие от описанной в работе [4] модели упругого контакта шероховатых поверхностей, в данной работе описана более общая математическая компьютерная модель, позволяющая производить расчет характеристик контакта технических поверхностей как при упругом контактировании выступов шероховатости, так и при упругопластическом.

Теоретические предпосылки. В качестве модели шероховатой поверхности в данной работе принята совокупность выступов в виде сферических сегментов разного радиуса. Сферические сегменты имеют разную высоту и располагаются на средней плоскости, так как деформация шероховатого слоя на величину, превышающую высоту сглаживания R_p невозможна в принципе. Радиусы выступов и высота их относительно средней плоскости являются случайными числами, подчиняющимися закону равномерного, нормального или бета распределения.

Взаимодействие моделируемых поверхностей является дискретным и происходит по вершинам отдельных выступов шероховатости. Действующая на контактирующие поверхности нагрузка нормальна по отношению к средней плоскости. Контакт единичных неровностей считается центральным. Взаимное влияние деформируемых выступов не учитывается. Распределение пятен контакта по поверхности считается равномерным, поэтому контактирующие поверхности в течение всего периода взаимодействия остаются взаимно параллельными. Материалы контактирующих тел однородны и изотропны, механические постоянные материалов взаимо-

действующих тел в процессе деформирования не меняются. По характеру деформирования материала контакт единичного выступа упругий либо упругопластический. Критерием перехода от упругого контакта к упругопластическому является величина критической деформации выступа.

Исходными данными для численного моделирования являются характеристики микрогеометрии поверхностей – высота сглаживания выступов R_p и максимальный радиус закругления вершин выступов r_{max} ; функции плотности вероятности случайных величин – высот и радиусов закругления вершин выступов; физико-механические характеристики материала – модуль упругости (модуль Юнга) E , предел текучести материала σ_s и коэффициент Пуассона μ .

Для расчета характеристик единичного контакта при упругой деформации используется решение задачи Герца о контакте тел сферической формы. Радиус области контакта a тел при деформировании определяется по формуле

$$a = \left(\frac{3NR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где N – нормальная нагрузка; R – приведенный радиус кривизны; E^* – приведенный модуль упругости;

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1},$$

где μ_i и E_i ($i = 1, 2$) – соответственно коэффициент Пуассона и модуль упругости взаимодействующих тел.

Взаимное сближение δ тел при упругом деформировании определяется по формуле

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{9N^2}{16RE^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

При упругопластической деформации для верхней оценки среднего контактного давления при вдавлении шара в упругопластическое полупространство в работе [5] приводится выражение

$$\frac{P_r}{\sigma_s} = \frac{2}{3} \left[2 + \ln \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{E^*}{\sigma_s} \cdot \frac{a}{R} \right) \right]. \quad (1)$$

Радиус области контакта при упругопластическом внедрении единичной неровности в виде сферы равен [6]

$$a = \sqrt{\alpha 2R\delta}, \quad (2)$$

где α – коэффициент, характеризующий различие геометрической площади сечения выступа на некотором уровне и площади единичного контакта.

При упругих деформациях $\alpha = 0,5$, при идеально пластических деформациях в зоне касания $\alpha = 1$.

С учетом того, что первые пластические деформации зарождаются при $P_r/\sigma_s \approx 1,1$ для критической точки из формулы (1) получим

$$\frac{E^*}{\sigma_s} \cdot \frac{a_{кр}}{R} \approx 2. \quad (3)$$

Подставив (2) в выражение (3) и подставив полученное в (1) получим зависимость, позволяющую определять фактическое давление единичного контакта, при заданной деформации δ

$$\frac{P_r}{\sigma_s} = \frac{2}{3} \left[2 + \ln \left(\frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{\delta}{\delta_{кр}}} \right) \right].$$

Для определения значения критической деформации $\delta_{кр}$ из выражений (2) и (3) получим

$$\delta_{кр} = 2 \frac{\sigma_s^2 r}{E^{*2}}. \quad (4)$$

Алгоритм расчета. Расчет характеристик контакта в реализуемой компьютерной модели производится по следующему алгоритму. По заданным характеристикам микрогеометрии R_p и r_{max} моделируются две шероховатые поверхности с выступами в виде сферических сегментов. Для моделирования каждого выступа генерируется пара случайных чисел, соответствующих высоте и радиусу единичного выступа. Высоты выступов h_i распределены в диапазоне $[0, R_p]$, радиусы выступов r_i распределены в диапазоне $[0, r_{max}]$, причем учитывается условие $r_i \geq h_i$.

Для смоделированных поверхностей задается величина сближения и определяются выступы, вступившие в контакт. Очевидно, что сначала контактируют те неровности, у которых наибольшая суммарная высота.

При заданном сближении поверхностей для каждой пары выступов, вступивших в контакт, определяется деформация δ . Полученная деформация сравнивается со значением критической деформации и определяется характер деформирования выступов. Если фактическое значение деформации меньше значения критической деформации, то считается, что пара контактирующих выступов деформируется упруго и определяются воспринимаемая сформировавшейся площадью контакта нагрузка по формуле

$$N_i = \frac{4}{3} R_i^{1/2} \delta^{3/2} E^*,$$

где R_i – приведенный радиус кривизны контактирующих выступов.

В случае, если фактическая деформация превышает значение критической деформации, т.е. выступы деформируются упругопластически, то определяется фактическое давление единичного контакта по формуле

$$P_{ri} = \frac{2 \cdot \sigma_s}{3} \left[2 + \ln \left(\frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{\delta}{\delta_{кр}}} \right) \right].$$

Затем определяется площадь пятна контакта двух контактирующих сферических выступов.

$$A_{ri} = 2\pi\alpha R\delta,$$

Для случая упругопластического деформирования воспринимаемая нагрузка определяется из выражения

$$N_i = P_{ri} \cdot A_{ri}.$$

Результаты суммируются для всех взаимодействующих выступов, и определяется суммарная нагрузка и фактическая площадь контакта поверхностей. Среднее фактическое давление контакта определяется из выражения:

$$P_r = \frac{\sum N_i}{\sum A_{ri}}.$$

Результаты моделирования. На рис. 1 представлены результаты расчета относительной деформации $\varepsilon = \delta/Rp$ контакта двух одинаковых шероховатых

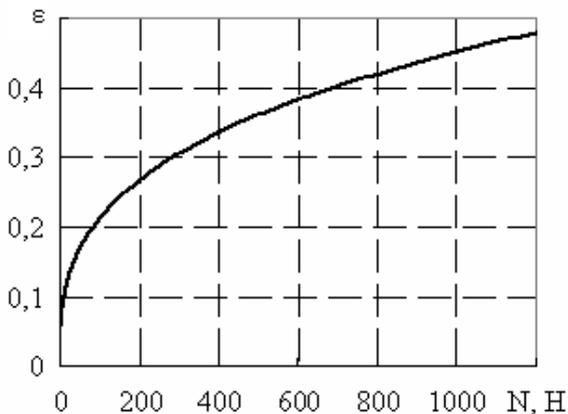


Рис. 1. Зависимость относительной деформации ε от нормальной сжимающей нагрузки N

поверхностей номинальной площадью $A_n = 19,7 \text{ мм}^2$ от нормальной сжимающей нагрузки с параметрами шероховатости $r = 25 \text{ мкм}$, $Ra = 0,63 \text{ мкм}$. Для стальных поверхностей $E \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $\mu \approx 0,3$, $\sigma_s \approx 260 \text{ МПа}$. Для типичной шероховатости принимаем $Rp \approx 3Ra$; $t_m = 0,5$.

На рис. 2 показано влияние величины $\zeta = r_{max}/Rp$ на величину относительной деформации $\varepsilon = \delta/Rp$ контакта двух одинаковых шероховатых поверхностей. Видно, что с увеличением параметра ζ снижается относительная деформация выступов при одинаковой сжимающей нагрузке (жесткость контакта увеличивается).

На рис. 3 представлены зависимости относительной деформации от нагрузки при различных значениях твердости материала контактирующих поверхностей. Результаты моделирования показывают, что деформация уменьшается с увеличением твердости материала контактирующих поверхностей.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными и теоретическими значениями [1, 6, 7] показывает, что разработанная модель адекватно описывает зависимость характеристик контакта от нормальной сжимающей нагрузки. Между численным моделированием, результатами

расчетов на основе аналитических зависимостей и экспериментальными данными имеется удовлетворительное соответствие.

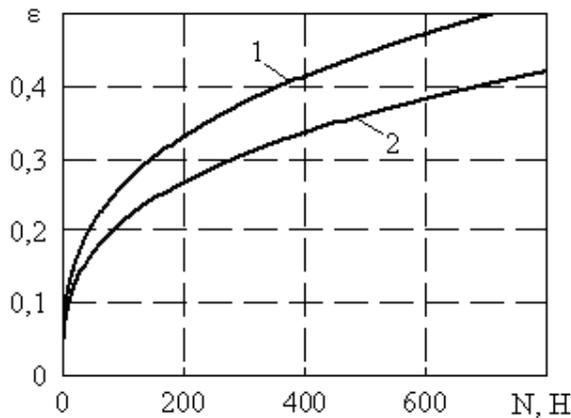


Рис. 2. Влияние величины $\zeta = r_{max}/Rp$ на деформацию контакта:
1 – $\zeta = 10$; 2 – $\zeta = 20$

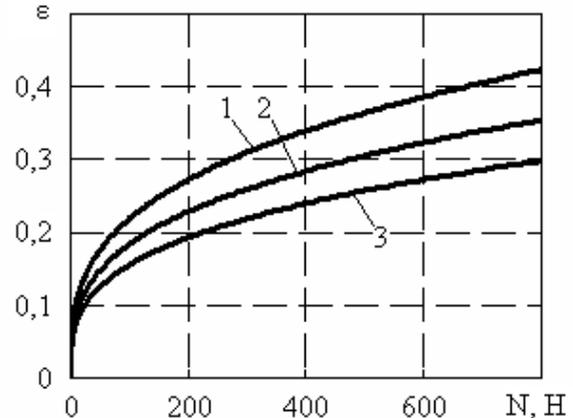


Рис. 3. Влияние твердости материала на деформацию контакта:
1 – $HB = 1500$ МПа; 2 – $HB = 3000$ МПа;
3 – $HB = 6000$ МПа

Таким образом, разработанная модель позволяет прогнозировать изменение характеристик контакта в зависимости от параметров шероховатости поверхности и физико-механических свойств материалов и, следовательно, может быть полезна для оценки свойств контакта на стадии проектирования оборудования.

Библиографический список

1. Демкин, Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей / Н.Б. Демкин. М.: Наука, 1970. 227 с.
2. Greenwood, J.A. Contact of Nominally Flat Surfaces / J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson // Proceedings of Royal Society, 1966. Series A. V. 295. P. 300–319.
3. Измайлов, В.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. Тверь: ТГТУ, 2010. 112 с.
4. Измайлов, В.В. Моделирование контактного взаимодействия шероховатых поверхностей в условиях тангенциальных микроперемещений / В.В. Измайлов, Д.А. Левыкин // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. № 4. С. 16–22.
5. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. М.: Мир, 1989. 510 с.
6. Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
7. Демкин, Н.Б. Теория контакта реальных поверхностей / Н.Б. Демкин // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТГТУ, 2001. С. 9–19.

УДК 621.891

Г.Б. Бурдо, М.В. Васильев
Тверской государственной технической университет

РАЗВИТИЕ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ТВЁРДОСМАЗОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ

В статье изложены результаты исследования фрикционных характеристик при контактном взаимодействии шероховатых поверхностей. Показана разработанная математическая модель, описывающая упругопластическое деформирование единичной неровности с твёрдосмазочным покрытием.

Ключевые слова: фрикционные характеристики, твёрдосмазочные покрытия, контактное взаимодействие, шероховатые поверхности.

THE DEVELOPMENT OF DISCRETE MODELS OF THE CONTACT INTERACTION OF ROUGH SURFACE WITH SOLID LUBRICANT COATING

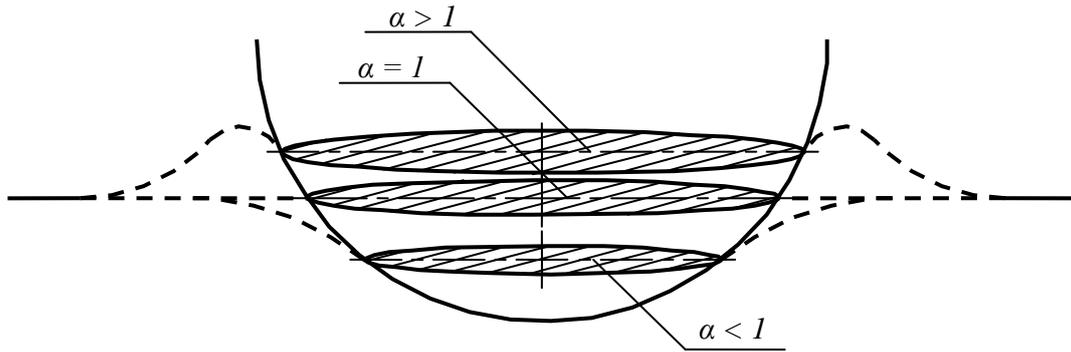
The results of the research of the friction characteristics of the contact interaction of rough surfaces are reported. The developed mathematical model for the description of the elastoplastic deformation of a single asperity with solid lubricant coating is described.

Key words: friction characteristics, solid lubricant coatings, contact interaction, rough surfaces.

Целью данной работы явилась разработка дискретной модели контактного взаимодействия шероховатых поверхностей с твёрдосмазочным покрытием (ТСП), позволяющей определить фрикционные характеристики при их взаимодействии. В работе [1] были использованы принципы математического моделирования, позволяющие более точно, чем известные аналитические расчёты, определять фрикционные характеристики контакта. Точность расчётов достигается за счёт моделирования на ЭВМ деформирования каждого отдельного выступа с учётом статистического распределения неровностей, как по высоте, так и по радиусам закругления их вершин.

В основу модели положены зависимости, описывающие упругопластическое деформирование единичной неровности с твёрдосмазочным покрытием, полученные в работе [2] и уточненные при помощи метода конечных элементов (МКЭ) для конкретных материалов [3]. Как и в случае с металлическим полупространством, уточнение расчётов происходит за счёт учёта выпучивания, которое возникает вследствие пластического оттеснения материала покрытия моделью неровности.

Влияние выпучивания на характеристики контактного взаимодействия сферического индентора можно оценить с помощью коэффициента α , определяемого как отношение фактической площади контакта (ФПК) модели неровности к площади её сечения на глубине фактического внедрения (рис. 1). При упругом контакте $\alpha = 0,5$, а при идеально-пластическом, без учёта выпучивания деформируемого материала, $\alpha = 1,0$.

Рис. 1. Схема к определению коэффициента α

Полученные МКЭ результаты, как для полупространства, так и для покрытий удовлетворительно аппроксимируются функцией вида

$$\alpha = A \cdot k^n,$$

где A и n – коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств материала, k – отношение приложенной к контакту нагрузки к величине критической нагрузки перехода к упругопластической деформации.

Преимуществом данного метода является возможность использования в расчётах с помощью МКЭ кривых деформирования реальных материалов, что позволяет достаточно точно описать их реальное поведение. Результаты расчётов по уточнённым зависимостям хорошо соответствуют экспериментальным данным и расчётам с помощью МКЭ.

Исходные данные, используемые в описываемой модели, представлены в таблице.

Исходные данные для расчёта

Параметр		Обозначение
Параметры микрогеометрии поверхности	Максимальная высота выступа над средней линией	R_p
	Максимальный радиус закругления вершин выступов	r_{max}
	Число выступов	n
	Толщина покрытия	δ
	Шаг внедрения	Δp
	Параметры бета-распределения	ν_b, w_b, ν_r, w_r
Физико-механические параметры	Модуль упругости материала покрытия и основания	E_1, E_2
	Коэффициент Пуассона материала покрытия и основания	μ_1, μ_2
	Предел текучести материала покрытия	σ_{m1}
	Параметры выпучивания	A, n

Отдельно отметим, что в модели при вероятностном описании микрогеометрии используется бета-распределение. Такое распределение случайной величины x задаётся плотностью вероятности $f(x)$, имеющей вид:

$$f(x) = \frac{\Gamma(\nu + w)}{\Gamma(\nu) \cdot \Gamma(w)} \cdot x^{\nu-1} \cdot (1-x)^{w-1}.$$

Алгоритм расчётов представлен на рис. 2 и состоит в следующем.

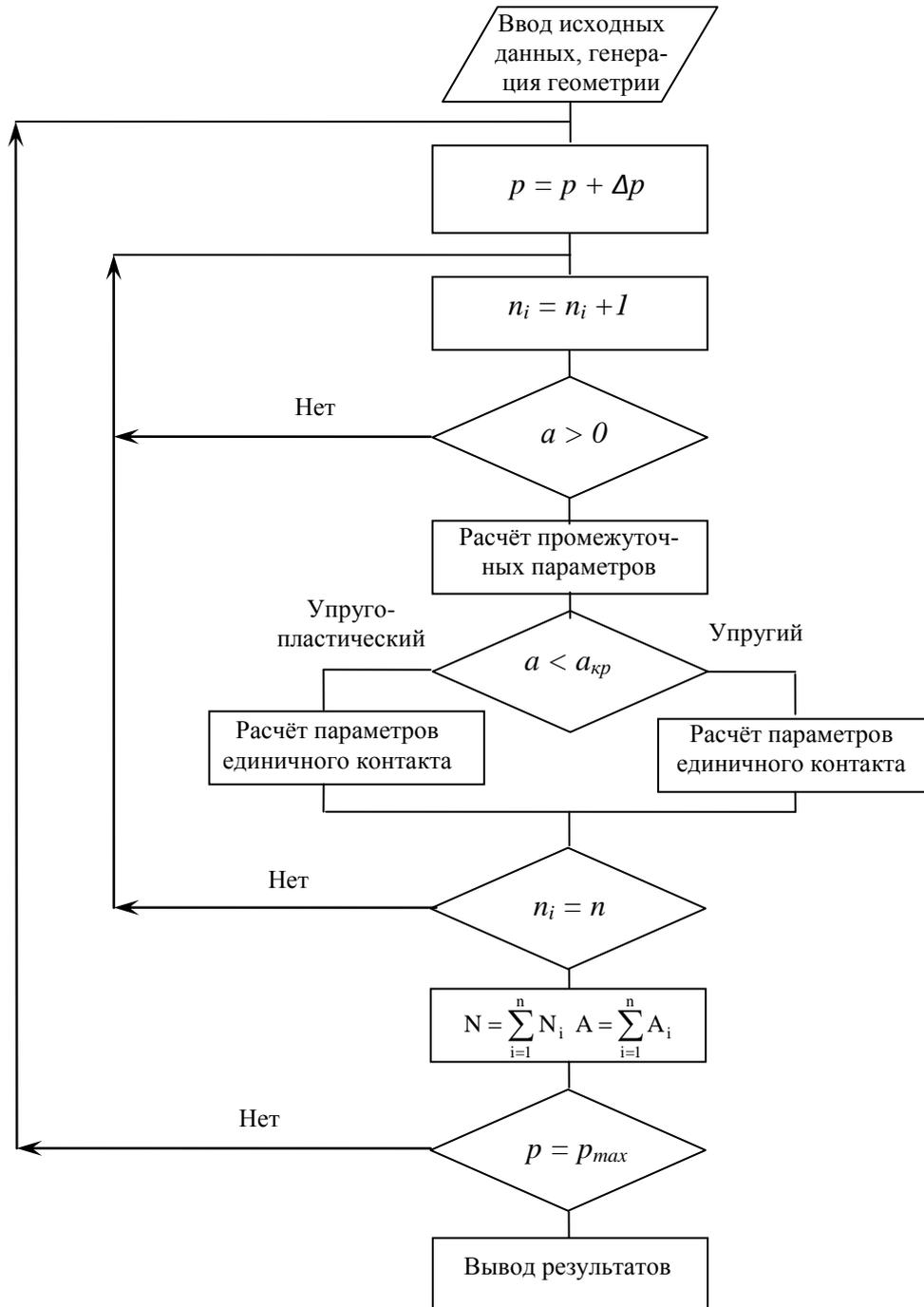


Рис. 2. Схема алгоритма вычисления деформационных характеристик контакта

В соответствии с выбранными статистическими законами, для каждой неровности генерируется её высота h_i и радиус R_i . Затем задаётся шаг Δp приращения внедрения p шероховатой поверхности в покрытие в долях от максимального внедрения p_{max} . На основании первичного шага рассчитывается внедрение каждой неровности в покрытие и количество контактирующих выступов n_i , определяется первоначальный ансамбль выступов. Далее

по уточнённым с помощью МКЭ соотношениям рассчитываются значения сил взаимодействия каждой неровности с покрытием и ФПК в зависимости от глубины внедрения. Причём с использованием уточнённых критериев для расчётов выбираются зависимости, соответствующие упругому или упругопластическому деформированию покрытия. Полученные величины соответственно суммируются для всех контактирующих выступов.

Следующий расчёт начинается приращением предыдущего внедрения на величину шага. Аналогично определяется обновлённый ансамбль выступов и его параметры взаимодействия, производятся расчёты. Циклы расчётов повторяются до достижения заданного значения внедрения p_{max} . Результаты представляются в виде зависимости нагрузки и ФПК от внедрения.

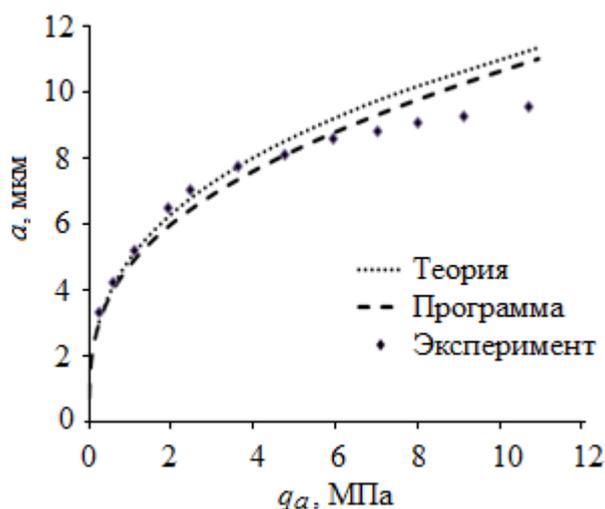


Рис. 3. Сопоставление различных результатов исследований зависимости контурного давления q_a от глубины внедрения шероховатой поверхности a

На рис. 3 сопоставлены экспериментальные, теоретические результаты и результаты расчётов при помощи описанной модели для контакта шероховатой поверхности с покрытием из материала ФБФ-74Д толщиной $\delta = 35$ мкм.

На графиках пунктирная линия с коротким штрихом соответствует расчётам по формулам для идеально пластичного материала, а пунктирной линией с длинным штрихом обозначен расчёт по программе. В свою очередь маркерами обозначены экспериментальные результаты.

Таким образом, разработанная на базе дискретной модели шероховатой поверхности программа доказывает свою состоятельность. Программа является мощным и удобным инструментом для расчёта параметров контактного взаимодействия шероховатых поверхностей с ТСП.

Библиографический список

- 1 Дёмкин, Н.Б. Некоторые результаты моделирования контакта шероховатых поверхностей / Н.Б. Дёмкин, В.В. Измайлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТГТУ, 2009. С. 29–35
- 2 Дёмкин Н.Б. Исследование упругопластического деформирования низкомолекулярных покрытий. / Н.Б. Дёмкин, О.В. Сутягин, О.О. Туманова // Трение и износ. 1994. Т. 15. № 2. С. 237–242.
- 3 Болотов, А.Н. Исследование упругопластических контактных деформаций металлов применительно к процессам фрикционного взаимодействия / А.Н. Болотов, О.В. Сутягин, М.В. Васильев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4(3). С. 977–981.

УДК 678.5 (088.8)

Г.Ф. Зюзина, О.Т. Чижевский
Федеральный научно-производственный центр «Прибор»,
А.П. Краснов
ИНЭОС им. А.Н. Несмеянова РАН,
Б.Ф. Зюзин
Тверской государственный технический университет
Н.А. Лобачев
Московский авиационный институт

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТРИБОУСТОЙЧИВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА СВЕРХВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Предложен механизм фрикционного взаимодействия полимерного ведущего пояса снаряда с нарезной частью канала ствола. Показано, что в результате фрикционного взаимодействия происходит перенос материала пояса на металлическую поверхность нарезной части канала ствола. В результате обеспечивается защита канала ствола от механического и эрозионного изнашивания и повышается ресурс ствола.

Ключевые слова: высокоскоростной узел трения, полимерный материал, механическое изнашивание, эрозионное изнашивание, ресурс.

THE RESULTS OF THE APPLICATION OF TRIBO-RESISTANT POLYMERS FOR THE INCREASE OF A LIFE TIME OF HIGH-SPEED FRICTIONAL UNITS

The mechanism of a frictional interaction of polymer rotating band of a shell with rifled part of a gun barrel bore has been proposed. It is shown that frictional interaction results in band material transfer on metal surface of rifled part of a gun barrel bore. Transferred polymer layer provides a bore surface mechanical and erosive wear protection. As a result, a gun barrel life time increases.

Key words: high-speed frictional unit, polymer material, mechanical wear, erosive wear, life time.

Одним из наиболее значительных достижений XX века в области материаловедения является создание полимерных композитов, успешно сочетающих свойства конструкционного материала (прочность, твердость, ударная вязкость) и смазки (низкий коэффициент трения), использование которых позволяет поднять на новый качественный уровень эффективность применения узлов сухого трения [1–3].

Показано, что роль полимерного материала в повышении ресурсных характеристик узла трения особенно отчетливо проявляется при эффективных режимах процесса (рис. 1), из которого следует, что замена в паре трения одного из металлических трущихся тел на пластмассу увеличивает срок службы узла трения втрое, а с ужесточением режима эксплуатации – почти в семь раз.

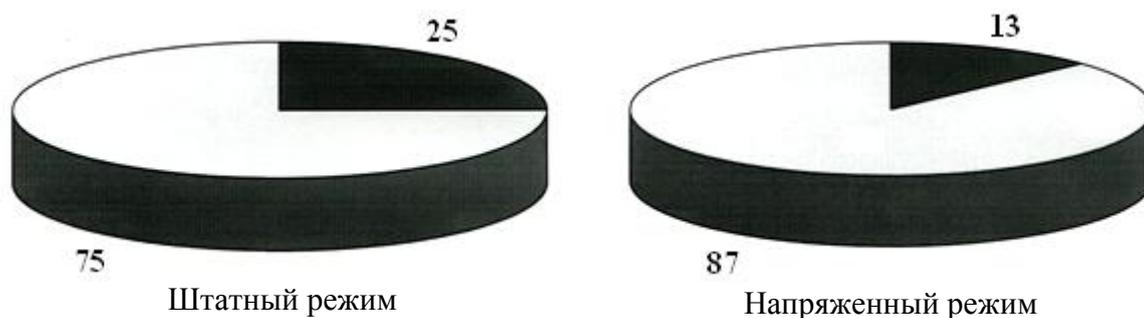


Рис. 1. Вклад основных элементов в повышение ресурса высокоэнергетического узла трения

Одной из таких классических металлополимерных пар трения может считаться система ведущий поясок артиллерийского снаряда (ВП) – нарезная часть канала ствола орудия (НЧКС), в котором контртелом является внутренняя поверхность канала ствола, а индентором – поясок снаряда. Взаимодействие в этой паре трения носит ротапринтный характер, т.е. с разогретой предыдущей стрельбой нарезной частью канала ствола контактирует каждый раз новая (свежая) поверхность ведущего пояска.

Проведенные исследования показали, что создание материала для ведущего пояска снаряда является весьма сложной и многоплановой задачей, при решении которой, прежде всего, необходимо учитывать особенности пластмасс, отличающие их от металлов (в данном случае от меди – традиционного материала для ВП). Наиболее важной особенностью является весьма существенная зависимость свойств пластмасс от температуры, которая для меди в температурном диапазоне эксплуатации настолько незначительна, что практически не учитывается при проектировании.

Первыми из материалов, которые были применены в качестве ВП, были стеклонаполненные полиамиды (ПА), использованные для повышения живучести стволов авиапушки GAU-8 (США) [4].

Однако использование композиций на основе полиамидов ограничивается особенностями химического строения полимера, у которого при температуре 353°K предел текучести снижается в 2 раза, а деформационные характеристики при температуре 213°K уменьшаются в 3 раза. Кроме того, ПА не обеспечивают заданных сроков хранения, и после 15 лет теряют механическую прочность на 30% [5].

Таким образом, важнейшей проблемой являлась проблема создания качественно нового полимерного материала.

ФГУП ФНИЦ «Прибор» совместно с ИНЭОС им. А.Н. Несмеянова РАН и рядом научных и промышленных предприятий для пластмассовых ведущих поясков снарядов был разработан материал на основе полиарилата (ПАР), сочетающий высокие физико-механические показатели, тепло- и термостойкость со способностью перерабатываться в изделия высокопроизводительным способом – литьем под давлением [6–9].

Отечественный материал для ВП по сравнению с используемым за рубежом имеет следующие преимущества:

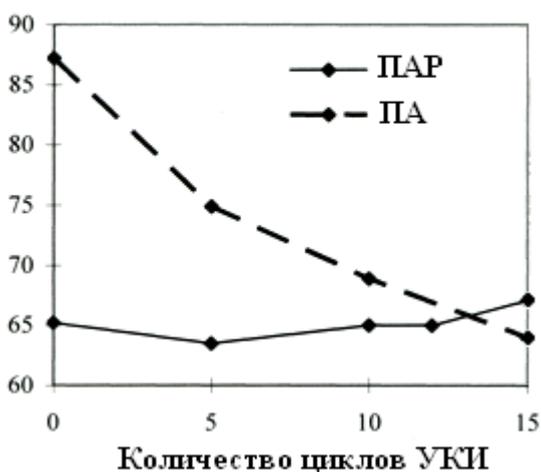
- Физико-механические показатели ПАР при хранении изменяются значительно меньше, чем у ПА (рис. 2), что адекватно отражается на работоспособности ВП. Так, после 5, 10 и 15 лет хранения снарядов ВП из ПАР обеспечивают надежную работоспособность. Для сравнения: ВП из ПА66 обеспечивают работоспособность только после имитации 5 и 10 лет хранения.

- Температурный диапазон эксплуатации ВП из ПАР, обусловленный большей по сравнению с ПА стабильностью структуры полимера при температурах выше 353°K , составляет $113\div 463^{\circ}\text{K}$. Установлено, что в температурном диапазоне эксплуатации (от 231 до 353°K) значения энергии деформирования для ВП из ПАР превышают энергию деформирования медного ВП, принятую за эталонную [6]. Для ВП из ПА66 значения энергии деформирования, близкие к эталонному (критическому), наблюдаются уже при температуре 333°K (рис. 3). Полученные результаты коррелируют с функционированием ВП.

- Полиарилат обладает более высокой стойкостью к некоторым химическим реагентам, применяющимся при производстве и эксплуатации боеприпасов (табл. 1).

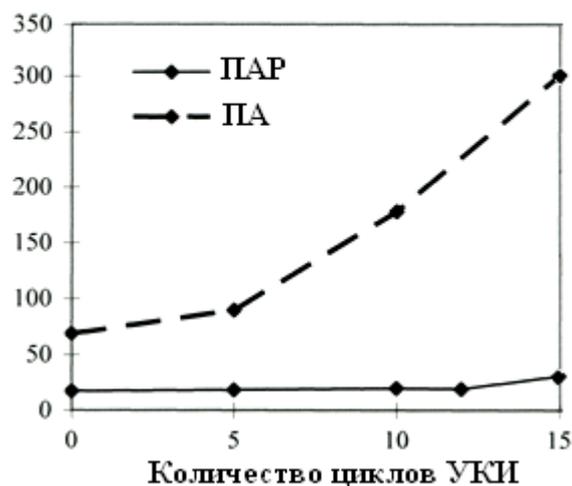
Замена медного ВП на полимерный ВП существенно изменяет механизм его взаимодействия с нарезной частью канала ствола (НЧКС), при этом не только устраняется деформация дульного входа канала ствола, но также значительно снижается его механическое и газэрозионное изнашивание.

Предел текучести при растяжении, МПа



а

Относительное удлинение при разрыве, %



б

Рис. 2. Изменение предела текучести при растяжении (а) в процессе хранения ПАР и ПА, изменение величины относительного удлинения при разрыве (б) ПАР и ПА в процессе хранения

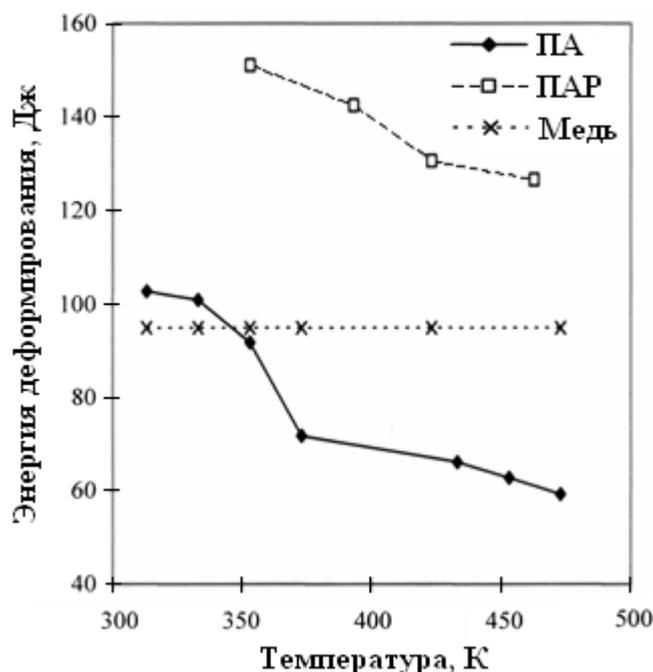


Рис. 3. Зависимость изменения энергии деформирования от температуры

Таблица 1. Сравнительная стойкость полиамида ПА66 и полиарилата по ГОСТ 12020-78

Химич. среда	Полиамид ПА66	Полиарилат
Керосин	Нестоек	Стойк
Р-5	Нестоек	Стойк
Р-648	Нестоек	Стойк
Лак ЛШ-10	Нестоек	Стойк
Герметик ВГО-1	Нестоек	Стойк
Морская вода	Нестоек	Стойк

Основываясь на результатах исследования трибохимических процессов в полимерах при трении металлополимерных пар, полученных ИНЭОС РАН [10–12], можно предложить следующий механизм взаимодействия пояска с нарезной частью канала ствола (НЧКС).

При движении по НЧКС поверхностный слой полимерного ВП расплавляется, в нем начинают происходить механохимические процессы, приводящие к образованию активных частиц – свободных радикалов, которые могут вступать во взаимодействие с атомами металла поверхности НЧКС, активированной воздействием ВП. В результате на ювенильной металлической поверхности образуется пленка переноса, состав, структура и толщина которой определяются процессами, протекающими на фрикционном контакте.

Под действием высокой температуры газового потока заснарядного пространства происходит карбонизация пленки переноса с образованием структур сложного состава, какими в предельном случае могут быть, кроме карбонизованных, играющих роль высокотемпературной смазки, и кластерные – высокотвердые образования, роль которых в трении зависит от их типа.

Возможно сосуществование 2-х типов кластеров:

1. Внутренние кластеры – формируются в массе материала, затем при перемешивании во время движения выходят из массы материала на поверхность ВП и, играя роль абразивных частиц, попадающих в зону трения, способствуют износу сопрягаемой поверхности. Это подтверждают данные электронно-микроскопических исследований: на поверхности НЧКС в направлении движения снаряда наблюдаются полосы.

2. Поверхностные кластеры – формируются на поверхности НЧКС и растут за счет рекомбинации активных центров, в результате чего на поверхности НЧКС образуется поверхностная пленка, а трибохимические процессы в системе определяются отношением содержания внутренних и поверхностных кластеров. Преобладание внутренних кластеров способствует увеличению износа НЧКС, а поверхностные, являясь мостиком между металлом и полимером, играют главную роль в формировании поверхностного слоя на металле.

Кластерные структуры химически активны, о чем свидетельствует увеличение толщины трибослоя с ужесточением режимов стрельбы (интенсивности воздействия) (табл. 2), когда уменьшается время контакта поверхности НЧКС с дезактиватором свободных радикалов – кислородом воздуха.

В условиях ротапринтного характера взаимодействия ВП с НЧКС при каждом выстреле с измененной поверхностью НЧКС контактирует новая поверхность ВП, которая генерирует в реакционное пространство новые и новые активные радикалы.

С образованием трибослоя идет уменьшение диаметра канала ствола по полям и нарезам, причем замеры показывают, что трибослой большей толщины образуется в нарезках ствола. Меньшая толщина трибослоя на полях может быть связана с тем, что при движении снаряда по каналу ствола часть ее снимается центрирующим утолщением.

Образующийся трибослой играет двойную роль: с одной стороны, он действует как дополнительное защитное покрытие, предохраняя поверхность НЧКС от механического и газоэрозионного изнашивания, с другой стороны, он является причиной исчерпания ресурса ствола, заполняя нарезки.

Таким образом, одним из основных факторов, определяющим ресурсные характеристики стволов автоматического артиллерийского оружия при применении полимерных ВП снарядов, является интенсивность формирования на поверхности НЧКС трибослоя при воздействии высокоэнергетических параметров выстрела.

Процесс формирования трибослоя зависит от ряда факторов.

Толщина трибослоя возрастает с наработкой (табл. 3).

Таблица 2. Изменение толщины трибослоя НЧКС от интенсивности воздействия, материал ВП – ПАР

Режим воздействия		Толщина трибослоя, мкм
Режим отработки	Перерывы, сек	
40×3	3-5; 40; 3-5	0,054
50×3	3-5; 3-5; 3-5	0,074
150	Нет	0,208

Таблица 3. Изменение толщины трибослоя на НЧКС от числа ротапринтных проходов (выстрелов), материал ПВП – ПАР

Число проходов (выстрелов)	Толщина трибослоя, мкм
352	0,05
1102	0,08
2043	0,10

Из рис. 4 видно, что на интенсивность образования трибослоя влияет химическая природа материала ВП. При одинаковых режимах стрельбы трибослой большей толщины образуется в случае использования ВП из полиамида. Замена полиамида на полиарилат «Делан» способствует снижению интенсивности образования трибослоя.

В пользу активного участия материала ВП в формировании трибослоя свидетельствует сопоставление результатов определения элементного состава

и энергетического состояния ингредиентов трибослоя и материала ВП, приведенных в табл. 4 и 5, из которых видно, что соотношение компонентов в трибослое близко к элементному составу исходного полимера.

Таблица 4. Элементный состав материала ВП и трибослоя, образовавшегося на поверхности НЧКС при стрельбе

Элемент	Полиамид ПА66		Полиарилат ДВ-524	
	Содержание элемента в материале ВП, % масс. (элементный анализ)	Содержание элемента в поверхности НЧКС после стрельбы (ЭСХА)	Содержание элемента в материале ВП, % масс. (элементный анализ)	Содержание элемента в поверхности НЧКС после стрельбы (ЭСХА)
С	63,7	82,3	76,1	92,4
О	14,2	14,4	17,7	7,2
Н	9,7		4,6	
F			1,5	
N	12,4	0,6		

Таблица 5. Результаты анализа внутренней поверхности НЧКС пушки ГШ-301 методом ЭСХА после отстрела на полный ресурс боекомплектами по 150 патронов

Материал ВП	Элемент (электрон)	Энергия связи, эВ	Содержание элемента, % масс
Полиамид ПА66	С (C1s)	285,05	82,3
	О (O1s)	531,75	14,4
	N (N1s)	399,45	0,6
Полиарилат ДВ-524	С (C1s)	285,02	92,4
	О (O1s)	532,72	7,2

Изменение диаметра КС, мм

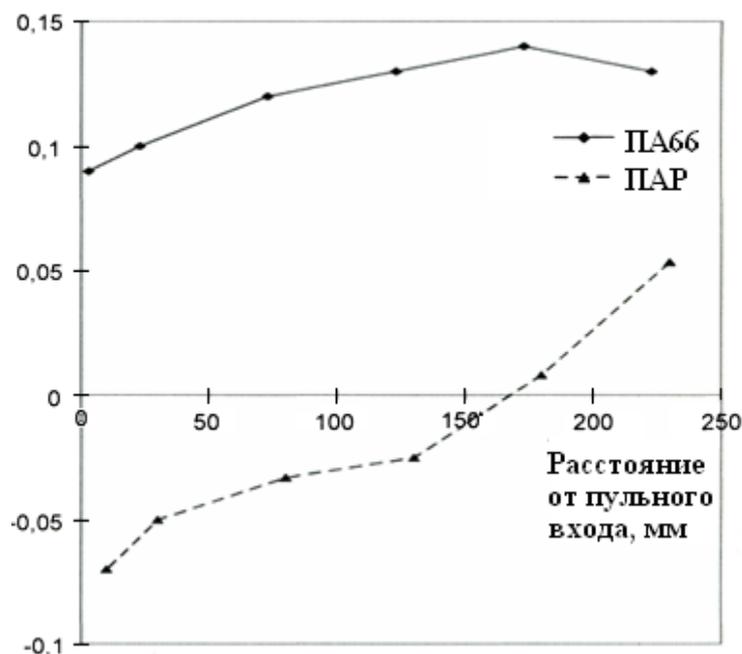


Рис. 4. Изменение размеров металлического контртела после 1000 ударов индентором из ПА66 и ПАР

Углерод и азот в трибослое химически активны, о чем свидетельствует, с одной стороны, увеличение толщины трибослоя с ужесточением режимов стрельбы (сокращением перерывов между очередями, когда лишь на короткое время возможен контакт поверхности НЧКС с кислородом воздуха), с другой – наличие в поверхности НЧКС кислорода, который в данном случае является ингибитором свободных радикалов.

Так как в процессе выстрела невозможно определить активность образовавшегося трибослоя, одним из косвенных путей оценки этого показателя может быть содержание в поверхности адсорбированного кислорода.

Результаты показывают, что количество кислорода, обнаруженного на поверхности НЧКС, зависит от химической природы материала ВП.

Так, в случае полиамида (ПА), количество кислорода в поверхности составляет 14,4%, что близко к содержанию его в полимере (14,2%), в то же время, при использовании ВП из полиарилата (ПАР) кислорода в трибослое обнаружено только 7,2%, что почти в 2,5 раза меньше по сравнению с исходным ПАР.

Исходя из полученных результатов, можно полагать, что большая активность поверхности НЧКС при контакте с ВП из ПА будет приводить при прочих равных условиях к формированию трибослоя большей толщины.

Для подтверждения этого предположения были проведены замеры микротвердости поверхности НЧКС после стрельбы снарядами с ВП из ПА и ПАР одинаковыми режимами.

Результаты представлены на рис. 5, из которого видно, что микротвердость поверхности НЧКС после стрельбы патронами с ВП из ПАР резко возрастает, и на глубине около 5 мкм становится сопоставимой с величиной твердости, характерной для хромового покрытия НЧКС после отстрела снарядами с медными ВП [6].

Микротвердость поверхности НЧКС после стрельбы патронами с ВП из ПА не достигает значений, близких к твердости хромового покрытия, вплоть до глубины ~ 15 мкм.

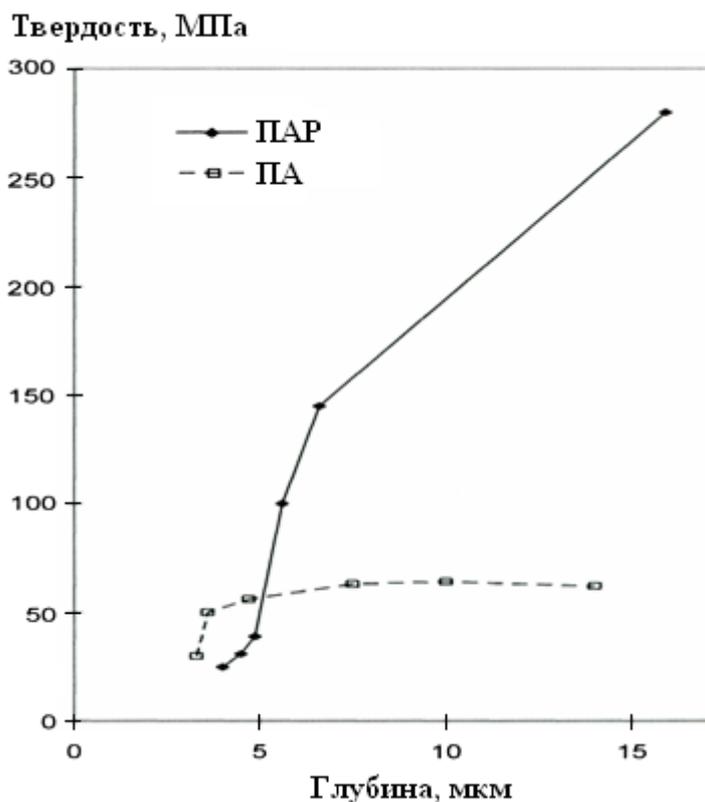


Рис. 5. Микротвердость трибослоя, образовавшегося в НЧКС после стрельбы с одинаковыми режимами патронами с ВП из ПАР и ПА

В связи с тем, что трибохимические процессы в металлополимерных узлах трения, к которым можно отнести и систему НЧКС-ВП, в значительной степени зависят от химической природы полимера, одним из возможных путей увеличения ресурса ствола может быть изменение свойств материала ВП таким образом, чтобы в целом система была трибостойкой, т.е. интенсивность образования трибослоя была минимальной.

Прежде всего, необходима локализация трибохимических процессов в возможно более тонких поверхностных слоях взаимодействующих ВП и НЧКС. Установлено, что более жесткий из исследованных материалов – полиарилат образует на поверхности НЧКС более тонкий трибослой (рис. 5), что способствует повышению ресурса стволов.

При использовании ВП из более термически устойчивых полимеров исчерпание ресурса по критерию заполнения нарезов ствола наступает позже, т.е. при большей наработке. В одинаковых условиях стрельбы (длина очереди, режим) замена ВП из полиамида ПА66 на ВП из полиарилата позволяет повысить ресурс вдвое [13].

Продукты карбонизации полимера, заполняющие нарезы канала ствола, частично выносятся из него потоком пороховых газов. Но в одинаковых условиях абляции могут быть удалены примерно равные весовые количества коксов. Поэтому в интенсивных условиях отработки предпочтительным становится использование ВП из полимеров с низким коксовым числом.

Таким образом, установлено, что взаимодействие ВП с НЧКС при выстреле можно представить как последовательность трех процессов:

- фрикционное взаимодействие ВП с НЧКС, результатом которого является перенос материала пояска на поверхность НЧКС;
- последующее воздействие на перенесенную пленку высокоэнергетического потока пороховых газов, при котором происходит карбонизация пленки переноса с частичной абляцией, в результате чего на поверхности НЧКС формируется трибослой;
- заключительной фазой формирования трибослоя является его дезактивация кислородом воздуха.

Максимальный эффект повышения ресурса стволов достигается только при последовательном сочетании указанных выше процессов.

Т.к. трибохимический слой обеспечивает защиту ствола от всех видов изнашивания, в том числе механического и эрозионного, полимерный ВП является универсальным средством повышения эффективности автоматического оружия, работающего в широком диапазоне режимов стрельбы.

Библиографический список

1. Машков, Ю.К. Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю.К. Машков. М.: Недра, 2004.
2. Дроздов, Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. М.: Машиностроение. 1986.

3. Дроздов, Ю.Н. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов. М.: ЭКО-Пресс, 2010.
4. Труды симпозиума по износу и живучести оружейных стволов. U.S. Army Armament Research and Development Command. 29–31 March, 1977.
5. Нелсон, У.Е. Технология пластмасс на основе полиамидов / У.Е. Нелсон. М.: Химия, 1979.
6. Мурашов, Л.А. Разработка патронов с пластмассовыми ведущими устройствами снарядов к автоматическим пушкам / Л.А. Мурашов, Г.Ф. Зюзина. Боеприпасы. 1995. № 5-6.
7. Патент RU № 2086900. Унитарный патрон / Л.А. Мурашов, С.Н. Куровский, Г.Ф. Зюзина, В.Л. Эггерт, О.Т. Чижевский, Е.С. Солдатов; заявл. 13.05.1995; опубл. 10.08.1997.
8. Патент RU № 2155929. Способ крепления пластмассовых ведущих поясков / Г.Ф. Зюзина, Е.С. Солдатов, И.О. Файман, О.Т. Чижевский, Л.А. Мурашов; заявл. 30.12.1999; опубл. 10.09.2000.
9. Открытие № 385. Явление разрушения волны дилатансии в многокомпонентных дилатантно адаптированных полимерных системах при сверхкритических скоростях деформирования / Г.Ф. Зюзина, В.Н. Спектор, [и др.]; приоритет № А-484 12.05.1995; опубл. 27.01.2010.
10. Краснов, А.П. Трибохимические активные и трибостабильные полимеры и полимерные системы / А.П. Краснов, В.А. Мить, О.В. Афоничева [и др.] // ТИИ. 2002. Т. 23. № 4.
11. Коршак, В.В. О некоторых проблемах создания новых термостойких антифрикционных пластмасс / В.В. Коршак, И.А. Грибова. // ТИИ. 1980. Т. 1. № 1.
12. Грибова, И.А. Успехи в области создания термостойких антифрикционных пластмасс / И.А. Грибова, О.В. Виноградова // Успехи химии. 1979. Т. 48. № 1.
13. Зюзина, Г.Ф. Критические концентрации в полимерных композициях в дилатантно адаптированных средах / Г.Ф. Зюзина, О.Т. Чижевский, Б.Ф. Зюзин // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2012. Вып. 5. С. 114-120.

УДК 531.43

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова
Тверской государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С УЧЕТОМ СУБШЕРОХОВАТОСТИ

Расчетно-экспериментальным путем с учетом субшероховатости контактирующих поверхностей определены физическая площадь контакта и критическое напряжение сдвига в контакте стальных шарового и плоского образцов. Радиус шарового образца 0,5 мм, нормальная нагрузка $0,5 \div 6$ мН. Радиус контурной площадки контакта шар – плоскость в зависимости от нагрузки составлял $1,5 \div 3,5$ мкм, что соответствует типичным размерам площадок единичных контактов неровностей шероховатых поверхностей. Экспериментальные значения критического напряжения сдвига сопоставлены с теоретическими.

Ключевые слова: субшероховатость, физическая площадь контакта, критическое напряжение сдвига.

INVESTIGATION OF THE ADHESIVE INTERACTION OF STEEL SURFACES IN VIEW OF A SUBROUGHNESS

The physical contact area and ultimate shear stress of the steel ball- and- flat contact have been evaluated in the calculation-experimental way in view of a subroughness of contact surfaces. The ball radius equals to 0,5 mm, normal load varies over the range 0,5 to 6 mN. The contour spot radius of ball-and-flat contact varies over the range 1,5 to 3,5 micrometers. Values such as these correspond with typical sizes of single contacts of rough surface asperities. Experimental values of ultimate shear stress have been compared to theoretical ones.

Key words: subroughness, physical contact area, ultimate shear stress.

В работе [1] приводятся экспериментальные данные по адгезионному взаимодействию металлических поверхностей в условиях трения покоя на микроуровне. При обсуждении результатов отмечается, что наблюдаемые расхождения теоретических и экспериментальных значений критического напряжения сдвига (КНС) фрикционного контакта могут быть связаны с игнорированием роли субшероховатости, присутствующей на контактирующих поверхностях. В настоящей работе оценивается КНС контакта стальных поверхностей с учетом влияния субшероховатости на процесс формирования физической площади контактирования поверхностей.

Образцы и методика эксперимента. Эксперименты по определению КНС контакта стальных поверхностей проводили на микротрибометре [2], в котором исследуемые образцы контактируют по схеме шар – плоскость. Шаровой образец имеет диаметр 1 мм. В качестве плоских образцов использовали концевые меры длины (называемые часто плитками Иогансона). Образцы изготовлены из хромистой стали с твердостью HV не менее 800, что соответствует твердости индентирования по стандарту ISO 14577-1 $H_{IT} \approx 8,5$ ГПа. Поверхность образцов имеет шероховатость, соответствующую 13–14 классам.

Поверхности образцов перед экспериментом промывали полярным и неполярным растворителем и очищали активированным углем по методу Ахматова. В остальном методика эксперимента не отличалась от описанной в работе [1].

Параметры субшероховатости. Для оценки КНС фрикционного контакта с учетом субшероховатости необходимо располагать геометрическими характеристиками последней. Ввиду отсутствия нормированных параметров субшероховатости и в целях использования моделей дискретного контакта, разработанных для шероховатых поверхностей, будем использовать для описания субшероховатости характеристики, аналогичные характеристикам шероховатых поверхностей. Конкретно в расчетах использованы следующие параметры субшероховатости: Ra – среднее арифметическое отклонение профиля субшероховатости; Rp – наибольшая высота неровностей профиля субшероховатости над средней линией; tm – относительная опорная длина профиля субшероховатости на уровне средней ли-

нии; r – радиус закругления вершин выступов субшероховатости; v – параметр аппроксимации начальной части опорной кривой [3]. Перечисленные характеристики определяли с помощью атомного силового микроскопа. На рис. 1 показано 3D изображение поверхности плоского образца, на рис. 2 – типичный профиль субшероховатости и примеры кривых опорных поверхностей. Числовые значения параметров субшероховатости приведены в табл. 1.

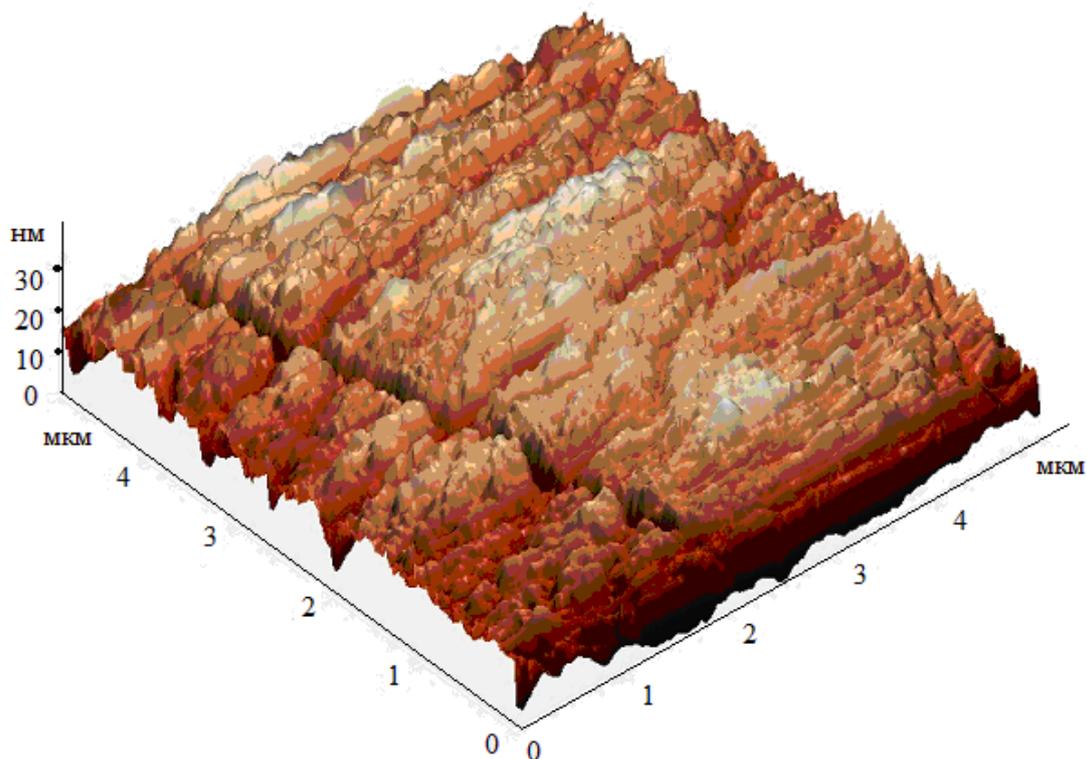


Рис. 1. 3D изображение поверхности концевой меры длины

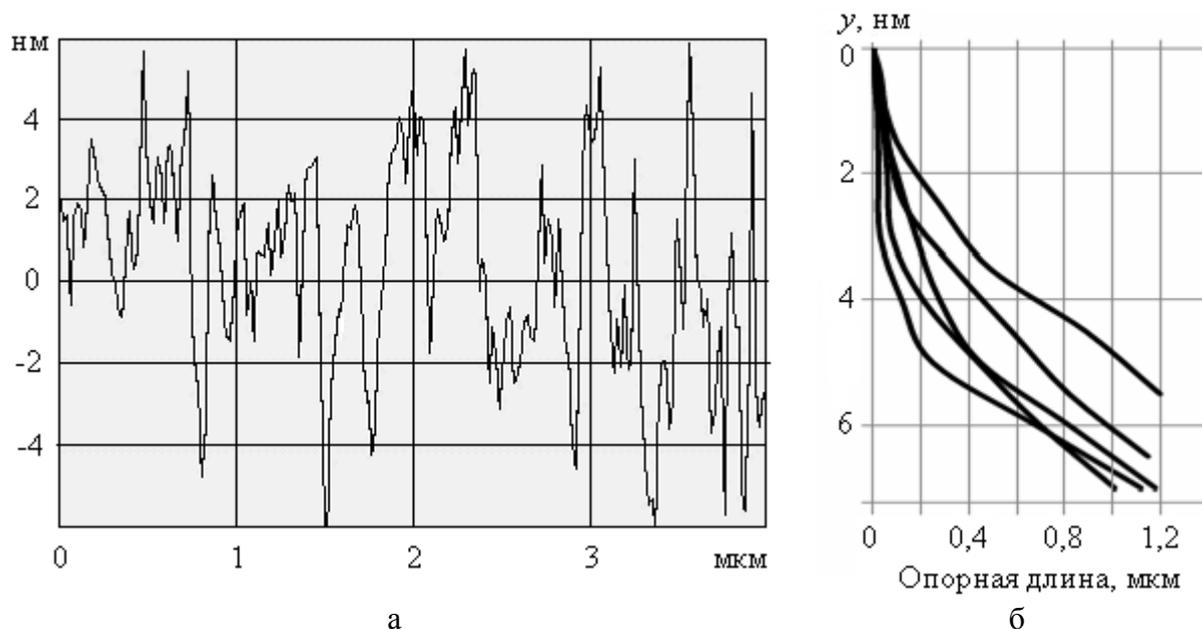


Рис. 2. Типичный профиль субшероховатости (а) и кривые опорных поверхностей (б), y – уровень сечения, отсчитанный от линии выступов

Таблица 1. Параметры субшероховатости (средние значения) исследованных образцов

Rp , нм	Ra , нм	r , нм	tm	ν
7,0	2,5	200	0,57	2

Параметр аппроксимации начальной части опорной кривой ν определяли двумя способами: непосредственной аппроксимацией (см. рис. 2) и по формуле [3]

$$\nu = 2 \cdot tm \cdot \frac{Rp}{Ra} - 1.$$

Рассчитанные таким образом значения параметра ν лежат в пределах $\nu = 1,8 \div 2,2$, поэтому в расчетах принято значение $\nu = 2$.

Расчет характеристик дискретного контакта с учетом субшероховатости. Площадь контакта гладких шара и плоского образца, согласно известному решению Герца, можно рассчитать по формуле

$$A_{\Gamma} = \pi a_{\Gamma}^2 = \pi \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{NR}{E^*} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

где a_{Γ} – герцевский радиус контакта; N – нагрузка на шаровой образец; R – радиус шарового образца; E^* – эквивалентный модуль Юнга, $E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$; E_1, E_2 и μ_1, μ_2 – модули Юнга и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих тел.

Присутствие субшероховатости на поверхности контактирующих тел приводит к тому, что, во-первых, контакт будет дискретным по вершинам контактирующих выступов субшероховатости. Во-вторых, размеры площадки контакта шарового образца с плоским должны измениться по сравнению с рассчитанными по формуле (1). Следуя принятой терминологии [4], будем называть суммарную площадь единичных площадок контактов выступов субшероховатости *физической площадью контакта*, а площадь круговой области, внутри которой располагается совокупность единичных площадок контакта, – *контурной площадью контакта* (по аналогии с понятием контурной площади контакта шероховатых волнистых поверхностей).

Для расчета контурной площади контакта воспользуемся решением, полученным ранее для контакта шара с шероховатой плоскостью [5]. Роль шероховатости в нашем случае играет субшероховатость. Согласно [5], контурную площадь контакта можно рассчитать по формуле

$$A_c = A_{\Gamma}(1 + 2\Phi) \cdot (1 + \Phi)^{-\frac{1}{\nu+\omega+2}}, \quad (2)$$

где Φ – комплексный параметр, зависящий от геометрических характеристик поверхности, упругих свойств материала и нормальной нагрузки N :

$$\Phi = \frac{R_p R^{\frac{\nu+\omega-2}{2(\nu+\omega)}}}{(\alpha \pi t_m K_3 \Omega)^{\frac{1}{\nu+\omega}}} \left(\frac{4E^*}{3} \right)^{\frac{2(\nu+\omega+1)}{2(\nu+\omega)}} N^{-\frac{2(\nu+\omega)-1}{2(\nu+\omega)}}, \quad (3)$$

где R_p – максимальная высота выступов субшероховатости над средней линией; R – радиус шарового образца; t_m – относительная опорная длина профиля субшероховатости на уровне средней линии; ν – параметр аппроксимации начальной части опорной кривой; α и ω – параметры, характеризующие вид деформации контакта; для упругого контакта $\alpha = 0,5$ и $\omega = 0,5$; K_3 – коэффициент, зависящий от параметра ν : $K_3 = 0,8$ при $\nu = 2$; $K_3 = 0,69$ при $\nu = 3$; $\Omega = \frac{4}{3\pi} E^* \left(\frac{R_p}{r} \right)^{\frac{1}{2}}$; r – радиус закругления вершин выступов субшероховатости.

Относительная физическая площадь контакта, по аналогии с контактом шероховатых поверхностей, может быть рассчитана по формуле [3]

$$\eta_s = \left(\frac{\frac{1}{\alpha^{2\nu} t_m^{2\nu}} p_c}{\Omega K_3} \right)^{\frac{2\nu}{2\nu+1}}, \quad (4)$$

где $p_c = N/A_c$ – контурное давление. Соответственно, физическая площадь контакта

$$A_s = A_c \eta_s, \quad (5)$$

а фактическое нормальное контактное давление

$$p_s = \frac{N}{A_s}. \quad (6)$$

На рис. 3 показаны зависимости характеристик контакта шар – плоскость от нагрузки на шаровой образец, рассчитанные по формулам (5) и (6) с использованием параметров субшероховатости из таблицы 1.

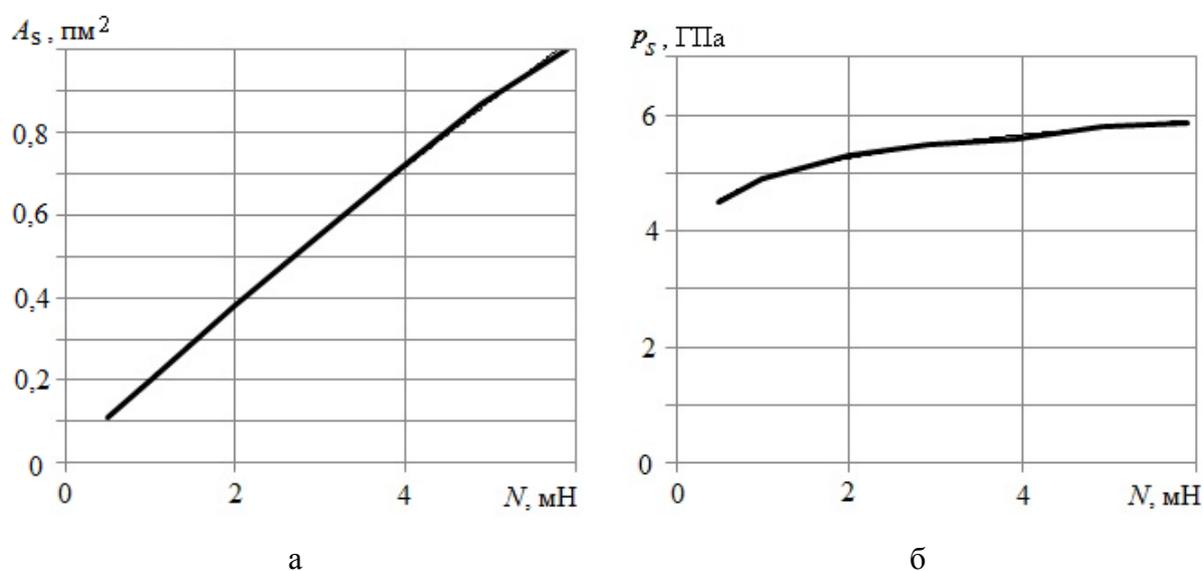


Рис. 3. Зависимость физической площади контакта (а) и фактического нормального давления (б) от нормальной нагрузки

Как и в контакте шероховатых поверхностей, зависимость физической площади контакта от нагрузки практически линейная (показатель степени 0,91). Фактическое нормальное давление слабо зависит от нормальной нагрузки (показатель степени 0,11).

Расчет КНС фрикционного контакта стальных поверхностей. Зная фактическое нормальное давление p_s , КНС τ_s для исследуемого контакта можно рассчитать по очевидной формуле

$$\tau_s = f p_s, \quad (7)$$

где f – коэффициент трения. Полученные в экспериментах на микротрибометре значения коэффициента трения представлены на рис. 4, а рассчитанные по уравнению (7) значения КНС – на рис. 5.

Как видно из рис. 5, КНС в данном случае убывает с ростом нормального давления.

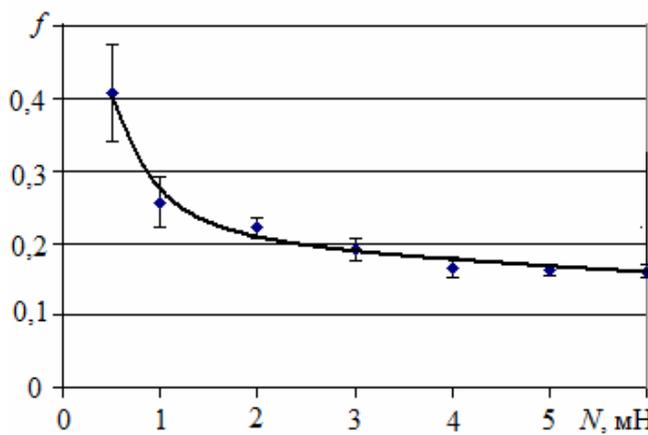


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от нагрузки

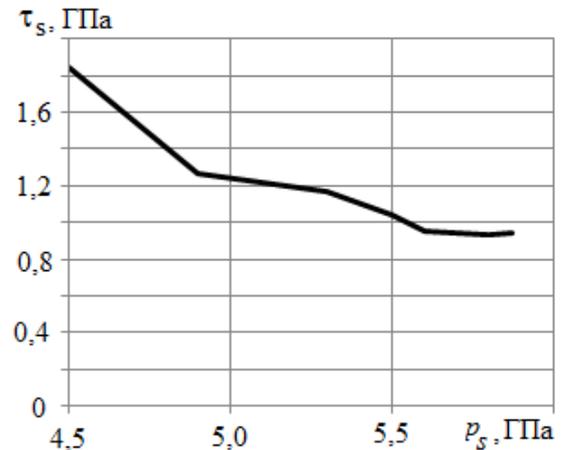


Рис. 5. Зависимость КНС от нормального давления

Обсуждение результатов. Полученные по формуле (7) значения КНС лежат в интервале $0,93 \div 1,84$ ГПа. В отличие от полученных экспериментально в работе [1] значений КНС (без учета влияния субшероховатости), которые более чем на порядок меньше теоретических значений, эти значения по порядку величины соответствуют теоретической оценке КНС для кристаллических тел $\tau_{s\text{теор}} = G/30$, где G – модуль сдвига. Для стали $G \approx 80$ ГПа, откуда $\tau_{s\text{теор}} \approx 2,7$ ГПа. Еще лучше совпадение экспериментальных значений КНС с теоретической оценкой этой величины по значению твердости: $\tau_{s\text{теор}} = \sigma_s/2 \approx H_{IT}/6$. При $H_{IT} = 8,5$ ГПа $\tau_{s\text{теор}} \approx 1,4$ ГПа. В данном случае мы имеем уже неплохое количественное совпадение.

Таким образом, учет субшероховатости при обработке экспериментальных данных по определению КНС фрикционного контакта, позволил приблизить экспериментальные значения КНС к теоретическим и получить неплохое количественное совпадение величин. Остается открытым

вопрос о характере зависимости КНС от фактического давления, изображенной на рис. 5. В отличие от известной формулы И.В. Крагельского $\tau = \tau_0 + \beta p_r$, согласно которой удельная сила трения τ растет с ростом фактического давления, на рис. 5 наблюдается противоположная тенденция. Этот вопрос нуждается в дальнейшем исследовании.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 12-08-00159-а).

Библиографический список

1. Измайлов, В.В. Адгезионное взаимодействие металлов в условиях трения покоя на микромасштабном уровне / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, Д.А. Гусев // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. №9. С. 40–46.
2. Патент РФ № 2150688. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала / В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, И.Н. Нестерова, А.А. Иванова; опубл. 10.06.2000. Бюл. № 16.
3. Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
4. Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap Between the Macro- and Micro/Nanoscale / Ed. by B. Bhushan. Dordrecht et.al.: Kluwer Academic Publishers, 2001. 984 p.
5. Demkin, N.B. Estimation of the deformation of rough spheres and cylinders in compression / N.B. Demkin, V.V. Izmailov, M.A. Korotkov // Wear. 1976. V. 39. P. 63–82.

УДК 621.891

О.В. Сутягин

Тверской государственный технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ ТВЁРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В МЕХАНИЗМАХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Проведёно исследование применения твёрдосмазочных покрытий в механизмах различного назначения и технологических процессах.

Ключевые слова: твёрдосмазочные покрытия, узлы трения, технологические процессы.

APPLICATION OF SOLID LUBRICANT COATINGS IN MECHANISMS AND INDUSTRIAL PROCESSES

Investigation of solid lubricant coatings application in mechanisms of different appointment and industrial processes is carried out.

Key words: solid lubricant coatings, friction units, industrial processes.

Твёрдосмазочные покрытия (ТСП) получили широкое применение не только в узлах трения космических летательных аппаратов (КЛА), где их впервые начали использовать, но и в условиях, когда традиционные смазки малоэффективны или неприменимы. Новыми областями применения ТСП стали: вооружения и авиация, чистые производства, вакуумная и криоген-

ная техника, автомобильная промышленность, оборудование для нефтяной, химической, пищевой и фармакологической промышленности, медицинская техника, электромеханические устройства, технологические процессы. В исторической перспективе обзор применений ТСП начнём с их использования в КЛА.

Согласно [1], в узлах трения КЛА производимых в США, применяются ТСП, состоящие из частиц дисульфида молибдена или из смеси частиц дисульфида молибдена с графитом, находящихся в связующем на органической или неорганической основе (таблица). Применение ТСП с силикатным связующим рекомендуется ограничить из-за их невысокой долговечности, кроме случаев, где они незаменимы (в среде жидкого кислорода).

ТСП, рекомендуемые NASA к применению в узлах трения КЛА

Марка ТСП	Компоненты	Спецификация
<i>Everlube</i> 620C	Mo S ₂ /графит + связующее на основе фенольной смолы	AS5272 Type 1
<i>Everlube</i> 811	Mo S ₂ /графит + силикатное связующее	MIL-PRE-81329D
<i>Everlube</i> 812	Mo S ₂ + силикатное связующее	MIL-PRE-81329D
<i>Tiolube</i> 460	Mo S ₂ + связующее на основе эпоксидной смолы	AS5272 Type II
<i>Ecoalube</i> 642	Mo S ₂ + связующее на основе эпоксидной смолы	AS5272 Type II

Указанные в таблице материалы производят компании *Tiodize Corporation* и *Everlube Products*.

Компания *Tiodize Corporation* является производителем ТСП на основе ПТФЭ (6 марок) под брендом *TIOLON*®; на основе Mo S₂ (5 марок) и на неорганической основе (5 марок) под брендом *TIOLUBE*® [2]. *TIOLUBE* 460 представляет из себя ТСП многоцелевого назначения, сохраняющее работоспособность при температурах до 343°С. Отметим, что ТСП на неорганической основе, производимые этой компанией, имеют рабочую температуру до 980°С и используются в приводах задвижек реактивных двигателей известных производителей.

ТСП под брендами *Everlube*® и *Ecoalube*® производятся компанией *Everlube Products* [3]. Кроме указанных, данная компания производит покрытия под брендами : *Lube-lok*®, *Lubri-Bond*®, *Ever-Slik*®, *Esnalube*™, *Perma-Slik*®, *Kal-Gard*®, *Electrobond*®, *Formkote*® (всего 77 марок). По данным производителя, *Everlube* 620C состоит из смеси графита и дисульфида молибдена в высокомолекулярной фенольной смоле горячего отверждения. ТСП работоспособно в диапазоне температур от –70° до 200°С и применяется в зубчатых передачах, шпинделях, направляющих, защёлках механизмов аэрокосмической, военной и медицинской техники. *Everlube* 811 состоит из смеси графита и Mo S₂ в связующем на силикатной основе горячего отверждения, работоспособное при температурах от –220° до 400°С и применяемое в узлах трения механизмов аэрокосмической и

военной техники. ТСП *Everlube* 812 состоит из частиц MoS_2 в связующем на силикатной основе горячего отверждения, работоспособное при температурах от -250° до $400^\circ C$ и применяется в узлах трения механизмов аэрокосмической и военной техники, а также в оборудовании для технологических процессов. *Ecoalube* 642 состоит из частиц MoS_2 в матрице из высокомолекулярной эпоксидной смолы горячего отверждения. ТСП работоспособно в диапазоне температур от -70° до $200^\circ C$ и применяется в подшипниках, зубчатых передачах, шпинделях, направляющих механизмов аэрокосмической и военной техники, а также оборудования для технологических процессов.

Для узлов трения КЛА, работающих при высоких температурах, применяются ТСП, получаемые плазменным напылением и состоящие из матрицы на основе сплава (например *Ni-Mo-Al*), твёрдой фазы (например Cr_2O_3) и твёрдых смазок (*Ag* и фтористые соединения) [4]. Такая композиция работает как ТСП при температурах около $500^\circ C$ (коэффициент трения $\sim 0,16$). При других температурах (выше и ниже оптимальной) коэффициент трения и износ таких покрытий возрастают. Применяются аналогичные композиции и из других материалов.

В работе [5] показана перспективность применения ТСП для узлов, которые будут эксплуатироваться в экстремальных условиях Луны и Марса.

Применение ТСП в КЛА является лишь «надводной частью айсберга». Значительное распространение и развитие ТСП получили в других областях техники. После успеха в космосе их начали в первую очередь использовать в военной технике. Кроме указанных выше компаний, ТСП, соответствующие спецификациям министерства обороны США, выпускают: *Dow Corning Corporation* [6] (производит 14 марок ТСП под брендом *Molykote*®, в том числе 1 для военных применений), *Sandstrom Products Company* [7] (производит 16 марок ТСП под брендом *Sandstrom*, в том числе 9 сертифицировано для военных), *Slickote Coatings* [8] (производит 12 марок ТСП под брендом *Slickote*®, в том числе 4 сертифицировано для военных), *Endura coatings* [8] (производит 5 марок ТСП рекомендованных для военных). Состав этих покрытий принципиально не отличается от рассмотренных выше.

Интерес *NASA* и военного ведомства способствовали быстрой коммерциализации ТСП. Появился термин «скользкие краски», включающий в себя ТСП на основе различных твёрдых антифрикционных материалов в матрице из органической или неорганической основы. Тренд подхватили производители полимеров, смазок и лакокрасочных материалов и начали производства ТСП, не ограничивая себя жёсткими спецификациями *NASA* и Министерства обороны США. Прогрессу в их широком применении способствовало развитие рынка услуг по качественному нанесению ТСП компаниями, осуществляющими финишную обработку поверхностей. На их

сайтах помимо рекламы общих преимуществ ТСП приводятся примеры, иллюстрирующие их практическое применение. Приведём часть из них.

Компания *Orion industries* [10] конкретизирует применения ТСП следующими узлами: механизмы затворов огнестрельного оружия, шарниры крепления автомобильных дверей, якоря электромагнитов, поршни автомобильных кондиционеров, роторы автомобильных нагнетателей, резиновые и пластиковые детали автомобилей, цилиндрические направляющие и пр. *Haward Corporation* [11] рекомендует применять ТСП в винтовых домкратах, регулировочных винтах, резьбовых задвижках, обратных клапанах, упорных шайбах, зубчатых колёсах, рычагах, опорах, шпиндельных узлах, пальцах, кулачках, толкателях, направляющих, клапанах, поршнях, болтах и гайках. Компания *Pioneer metal finishing* [12] дополняет перечень следующими характерными применениями: в автомобильной промышленности – системы безопасности (привода и замки ремней безопасности), системы перемещения и регулировки сидений, механизмы дверей, поршни, цилиндры, оси шарниров, конические вентили, направляющие и толкатели, крепёжные детали, подшипники скольжения, тяги и опоры, прокладки; в нормализованных деталях машин – гидравлическая арматура клапаны и распределители, уплотнения, пружины, муфты; в машиностроении – приспособления и оснастка; технологические процессы: гибка труб, горячая штамповка, литьё в постоянные формы алюминиевых сплавов и цинка; в военной технике – различные типы самолётов, вооружений, автотранспорта. *Chem. Processing* [13] рекомендует ТСП в шпоночных соединениях, карданах, направляющих клавиш электронных устройств, для обработки деталей реактивных двигателей перед их сборкой, для облегчения освобождения готовых изделий из термопластов при их формовании. Компания *Imagineering Finishing Technologies* [14] рекомендует применять ТСП в трибосопряжениях работающих в коррозионной среде, для консервации деталей, для часто разбираемых и труднодоступных узлов, для работы в условиях высокой запылённости, для узлов, подверженных фреттинг коррозии. И, наконец, компания *Metal Improvement Co* [15], которая является пионером в промышленном нанесении ТСП, просто указывает, что ТСП эффективны везде, где обычные жидкие смазки недостаточно защищают от высокой температуры, экстремальных нагрузок, износа и коррозии.

Представляет интерес, какие твёрдосмазочные материалы [16] и связующие используются в настоящее время в ТСП общепромышленного применения.

Компания *Henkel* под торговой маркой *Acheson*TM выпускает ТСП *Emralon*®, *Molydag*®, *DAG*® [17]. *Emralon*® представляют ТСП (8 марок) в которых в качестве твёрдосмазочного материала используется фторполимер, а в качестве полимерной основы термопласты, фенольная, полиуретановая, полиамидная, алкидная и акриловая смолы горячей полимеризации. *Emralon*® применяется для покрытий резиновых уплотнений, деталей

карбюраторов, принтеров, приводов автомобильных фар, и пр. *DAG*® представляет ТСП (2 марки) на основе графита с термопластическим или эпоксидным связующим горячей полимеризации. Это покрытие применяется в прокладках головки блока цилиндров автомобильных двигателей и выхлопных систем, в реактивных двигателях. Оно защищает детали от схватывания до температуры 583°C. *Molydag*® представляет из себя ТСП (2 марки), в одном из которых в качестве основы использована смесь графита и дисульфида молибдена с неуказанной смолой горячей полимеризации, а в другом дисульфид молибдена в эпоксидной смоле также горячей полимеризации. Данные ТСП используются в самых ответственных и тяжёло-нагруженных узлах. Например, взаимодействующие детали кресла-катапульты пилота истребителя, двери для аварийной эвакуации людей.

Компания *Fuch Lubritech GmbH* [18] специализируется на выпуске ТСП, применяемых в автомобильной промышленности. Среди потребителей её продукции такие авто производители как *Daimler AG, Volvo, Saab*. Так в легковом автомобиле Мерседес-Бенц Е-класса имеется 12 узлов, в которых применяются ТСП этой фирмы. К ним относятся: уплотнения дверей, пластиковые детали интерьера, соединения коммутационных устройств двигателя, детали системы впрыска топлива, кольцевые резиновые уплотнения, прокладки, болты колёс, выхлопная система, механизм регулировки сидений, механизм втягивания ремней безопасности, скользящие детали обивки крыши, детали дверного замка. Причём в перечисленных узлах ТСП применяется не только как долговременная смазка, но и для облегчения сборки и снижения шумов. Компания выпускает ТСП под брендом *Gleitmo* (17 марок) на основе ПТФЭ (8 марок), дисульфида молибдена (6 марок) и графита (3 марки). Применяются органические и неорганические связующие горячего и холодного отверждения, в том числе и водорастворимые.

Список компаний выпускающих различные варианты подобных ТСП можно значительно расширить, однако далее отметим лишь те, которые используют не типичные антифрикционные материалы и связующие.

Компания *Carl Bechem GmbH* [19] выпускает ТСП под брендом *Berucoat* (14 марок). Она, помимо традиционных, использует в ряде своих рецептур в качестве антифрикционных наполнителей воск, наночастицы и микрокапсулы. Инновационная микрокапсульная нанотехнология (*Berucoat MC*) позволяет в микроскопические шарообразные контейнеры из защитного лака помещать смазочный материал, который вступает в работу только после разрушения микроконтейнера от приложенной нагрузки и, освобождаясь, снижает трение и износ на микроконтактах. Недостатком таких ТСП является узкий, как у обычных смазок, диапазон их рабочих температур (–40°C...80°C).

Компания *Indestructible Pain Ltd* [20] выпускает высокотемпературное ТСП марки IP3016, в котором в качестве антифрикционного материала ис-

пользуется дисульфид вольфрама, а в качестве связующего полимерная смола. Данное покрытие имеет температуру длительной работоспособности около 400°C.

Высокотемпературное ТСП марки *MS-132 BN* – аэрозольный продукт на основе гексоганального нитрида бора, выпускаемый компанией *Miller-Stephenson Chemical Company, Inc.* [21], предназначен для применения в технологических процессах (смазка металлических форм при литье лёгких сплавов). Покрытие не содержит полимерного связующего и поэтому работоспособно до температуры 850°C.

Компания *LPS Laboratories* [22] производит ТСП марки *DRY FILM Silicone Lubricant* в котором в качестве антифрикционного материала применяется фторполимер, а в качестве связующего силикон. Покрытие хорошо работает при температуре до 260°C, не требует сложной подготовки поверхностей перед нанесением, выпускается в аэрозольных баллонах. Применяется для смазки технологического оборудования (конвейеры, заслонки, системы впрыска при литье пластмасс под давлением), пластиковых, резиновых и деревянных скользящих деталей. Кроме этой марки компания выпускает ТСП под марками *DRY FILM PTFE Lubricant* (ПТФЭ, а в качестве связующего также силикон) и *FORCE 842® Dry Moly Lubricant* (многокомпонентный полимер с добавлением дисульфида молибдена). Последнее ТСП работоспособно при температурах до 450°C (842°F) и применяется в приводах шасси самолётов, регулировочных винтах тормозов, в механизмах технологических печей (двери, подающие цепи, тележки, мостовые краны, подвесы, роликовые конвейеры).

Антифрикционные свойства ПТФЭ сделали его традиционным наполнителем для ТСП. Для снижения коэффициента трения покрытий компания *Du Pont* [23] разработала ТСП под торговой маркой *Du Pont™ DryFilm*, в которой полимерное связующее отсутствует. Дисперсии содержат частицы ПТФЭ сверхнизкого молекулярного веса в деионизированной воде, изопропиловом спирте или растворителе *HFC 43-10*. Дисперсии наносятся как обычные ТСП и сушатся на воздухе или при повышенной температуре. *Du Pont™ DryFilm* применяют в технологических процессах: для смазки пресс-форм при производстве резин и пластиков; для обработки лотков, направляющих и конвейерных лент; для обработки бункеров и резервуаров. Однако из-за невысокой адгезии данные покрытия используют только в слабонагруженных узлах трения (велосипедные цепи, направляющие и ролики фурнитуры сдвижных дверей и окон, в молниях и застежках одежды и снаряжения, в режущем инструменте и садовом инвентаре). Применения *Du Pont™ DryFilm* расширено за счёт возможности нанесения его на изделия из пластика, древесины, керамики и бумаги, а также за счет простоты подготовки поверхностей (они должны быть чистыми и сухими). Помимо этого компания выпускает дисперсии под торговыми марками *Du Pont™ Vydux® NRT 960* и *Du Pont™ Teflon® Non-Stick*

Dry-Film Lubricant, где использованы другие фторполимеры. Покрытие *Du Pont™ Vydax® NRT 960* пожаробезопасно, инертно, совместимо с жидким кислородом и работоспособно при температурах до 200°C. Оно применяется в клапанах и уплотнениях, работающих в среде кислорода, для облегчения сборки деталей из пластиков, эластомеров и металлов, для выключателей и разъёмов, работающих в вакууме. Универсальное антифрикционное и противопригарное покрытие *Du Pont™ Teflon® Non-Stick Dry-Film Lubricant* имеет более широкое применение (деревообрабатывающий инструмент, цепи, шестерни, опоры, клапана, направляющие, прокладки и пр.) и продаётся в розничной торговле.

Выпуском различных вариантов подобных фторполимерных дисперсий, сертифицированных для применения в пищевой и фармацевтической промышленности, занимается компания *Interflon* [24], для медицинской техники *MicroCare Corporation* [25], а для общепромышленного применения компания *Miller-Stephenson Chemical Company, Inc.* [21]. В связи с малой толщиной получаемые из дисперсий покрытия рекомендуют применять в прецизионных сопряжениях.

Низкая адгезия покрытий из дисперсий фторполимеров не позволяет их применять в трибосопряжениях, длительно работающих при нормальных и повышенных нагрузках. Выход был найден компанией *Whitford Corporation* [26], разработавшей твёрдосмазочное покрытие *Xylan®*. Данное покрытие представляет из себя смесь антифрикционных фторполимеров с упрочняющей смолой. В отличие от композиционных ТСП типа *Emralon®*, в которых частицы ПТФЭ находятся в связующей смоле в виде дисперсии, в покрытие *Xylan®* молекулы упрочняющей смолы переплетают и удерживают молекулы фторполимеров, обеспечивая высокую прочность покрытия и его адгезию к подложке. Покрытия *Xylan®* сохраняют свою работоспособность в тяжело нагруженных узлах трения (коэффициент трения до 0,02), имеют высокую химическую и коррозионную стойкость, могут эксплуатироваться в широком диапазоне температур (-250...285°C), устойчивы к ультрафиолетовому излучению, имеют большую гамму цветов, обладают высокой эластичностью (деталь с покрытием может свободно изгибаться без его разрушения), поддаются механической обработке, имеют отличную адгезию к большинству металлов, пластиков, керамик, дереву и даже к самому себе. Такое сочетание свойств обеспечило применение *Xylan®* практически во всех областях техники, но прежде всего в химической, нефтяной и пищевой промышленности. Кроме ТСП *Xylan®* компания *Whitford Corporation* выпускает покрытие *Xylan XLR*, применяемое как противопригарное для пищевой посуды и для покрытия форм при изготовлении деталей из термопластов, и покрытие *Xylar®*, применяемое при более высоких температурах и представляющее из себя композицию из металлокерамических частиц в связующем из смолы *Xylan®*.

Здесь приведён далеко неполный перечень производителей и брендов ТСП из США и Европы. Отметим, что производством ТСП занимаются в Японии, Китае, Индии, Австралии и других странах, причём как под собственными марками, так и под брендами известных производителей. В России производство ТСП фактически прекращено после 1992 года.

Таким образом в настоящее время промышленно выпускаются и применяются ТСП 3-х типов:

1. Скользящие краски – ТСП, представляющие из себя композиции, аналогичные обычным краскам, в которых в качестве пигмента и наполнителя используются твёрдосмазочные материалы, а в качестве связующего полимерные смолы и неорганические составы. Отметим, что в качестве твёрдосмазочных материалов в подавляющем большинстве рецептур используется дисульфид молибдена, графит, ПТФЭ и их смеси. Другие известные твёрдосмазочные материалы не получили широкого практического применения. В качестве связующих при создании ТСП общепромышленного назначения используется большинство применяемых полимерных смол.

2. Дисперсионные – ТСП, представляющие из себя покрытие из твёрдосмазочного материала без связующего. Для улучшения адгезии покрытия и его механических свойств частицы твёрдосмазочного материала должны иметь наименьшие размеры (стремиться к нанометрам), а растворитель препятствовать образованию конгломератов частиц в дисперсии.

3. Монолитные – ТСП типа *Xylan*®, представляющие из себя покрытия, в которых антифрикционный полимер связывается и упрочняется на молекулярном уровне другим полимером, так что нельзя выделить антифрикционный материал и связующее как отдельные компоненты.

Наличие такого количества ТСП (сотни марок) и потребности в разработке новых составов делает разработку ускоренных методов их испытаний весьма актуальной.

Библиографический список

1. Process Specification for Dry-Film Lubricant Application / Engineering Directorate. Structural Engineering Division. March 2009. National Aeronautics and Space Administration. Lyndon B. Johnson Space Center. Houston, Texas // Julie A. Henkener, Bradley S Files. 11 p.
2. Tiodize Co., Inc. www.tiodize.com.
3. Everlube Products. www.everlubeproducts.com.
4. NASA PS400: A new High Temperature Solid Lubricant Coating for High Temperature Wear Applications / National Aeronautics and Space Administration. Glenn Research Center. Cleveland, Ohio. August 2009 // C. DellaCorte, B.J. Edmonds. 19 p.
5. Solid Lubricants and Coatings for Extreme Environments: State-of-the-Art Survey / National Aeronautics and Space Administration. Glenn Research Center. Cleveland, Ohio. January 2007 // Kazuhisa Miyoshi. 23 p.
6. Dow Corning Corporation. www.dowcorning.com.
7. Sandstrom Products Company. www.sandstromproducts.com.
8. Slickote Coatings. www.solidfilmlubricants.com.

9. Endura coatings. www.enduracoatings.com.
10. Orion industries. www.orioncoat.com.
11. Haward Corporation. www.haward.com.
12. Pioneer metal finishing. www.pioneermetal.com.
13. Chem Processing, Inc. www.chemprocessing.com.
14. Imagineering Finishing Technologies. www.imagineering-inc.com.
15. Metal Improvement Co. www.metalimprovement.com.
16. Solid Lubricants / NASA Technical Memorandum 103803. Lewis Research Center. Cleveland, Ohio. April 1991 // Harold E. Sliney. 38 p.
17. Henkel. www.henkel.com.
18. Fuch Lubritech GmbH. www.fuch-lubritech.com.
19. Carl Bechem GmbH. www.bechem.com.
20. Indestructible Pain Ltd. www.indestructible.co.uk.
21. Miller-Stephenson Chemical Company, Inc. www.miller-stephenson.com.
22. LPS Laboratories. www.lpslabs.com.
23. Du Pont. www.dupont.com.
24. Interflon. www.interflon.com.
25. MicroCare Corporation. www.MicroCare.com.
26. Whitford Corporation. www.whitfordww.com.

УДК 621.891

О.В. Сутягин

Тверской государственный технический университет

ТРЕНИЕ МОДЕЛИ ЕДИНИЧНОЙ НЕРОВНОСТИ ПРИ УСЛОВИИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Рассмотрена расчётная модель фрикционного взаимодействия единичной неровности при условии упругопластического контакта. Показано влияние физико-механических свойств материалов и приложенных нагрузок на коэффициент трения.

Ключевые слова: упругопластический контакт, коэффициент трения, сферический индентор, расчётная модель.

FRICION OF SINGLE ROUGHNESS MODEL ON CONDITION OF THE ELASTIC- PLASTIC CONTACT

Calculation model of frictional interaction of single roughness on condition of elastic-plastic contact is considered. The influence of physical-mechanical properties of the materials and imposed loads on coefficient of friction is shown.

Key words: elastic-plastic contact, coefficient of friction, spherical indenter, calculation model.

Согласно современным представлениям сила трения, возникающая при фрикционном взаимодействии твёрдых тел, имеет две составляющие - молекулярную и механическую. В основе молекулярной составляющей лежит процесс непрерывного возникновения и разрушения адгезионных связей на фактических пятнах контакта взаимодействующих поверхностей. Природа этих связей может быть различна – от металлической в очагах

микросхватывания до Ван-дер-Ваальсовой при контакте через адсорбированные плёнки. В основе механической составляющей лежит деформация неровностей взаимодействующих тел в процессе трения. В зависимости от принятой модели контакта она может рассматриваться с позиций теории упругости, вязкоупругости и пластичности [1, 2]. Представляет интерес оценка коэффициента трения модели единичной неровности в условиях упругопластического контакта как более общего случая.

Рассмотрим скольжение жёсткого сферического индентора, моделирующего единичную микронеровность, по упругопластическому полупространству. В случае, когда скорость скольжения постоянна, силы, действующие на индентор, можно представить так, как изображено на рис. 1. Распределённые по взаимодействующей с полупространством поверхности индентора нормальные и касательные напряжения приведены к равнодействующим силам, приложенным к центру сечения индентора, ограниченного областью контакта радиусом q . Суммируя проекции сил на оси координат, для коэффициента трения можно записать:

$$f = \frac{F_{\text{мол.х}} + F_{\text{пл.}} + F_{\text{уп.}}}{N - F_{\text{мол.у}}}, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения; $F_{\text{мол.х}}$ – проекция молекулярной составляющей на ось X; $F_{\text{пл.}}$ – пластическая компонента механической составляющей; $F_{\text{уп.}}$ – упругая компонента механической составляющей; N – проекция силы S на ось Y; $F_{\text{мол.у}}$ – проекция молекулярной составляющей на ось Y.

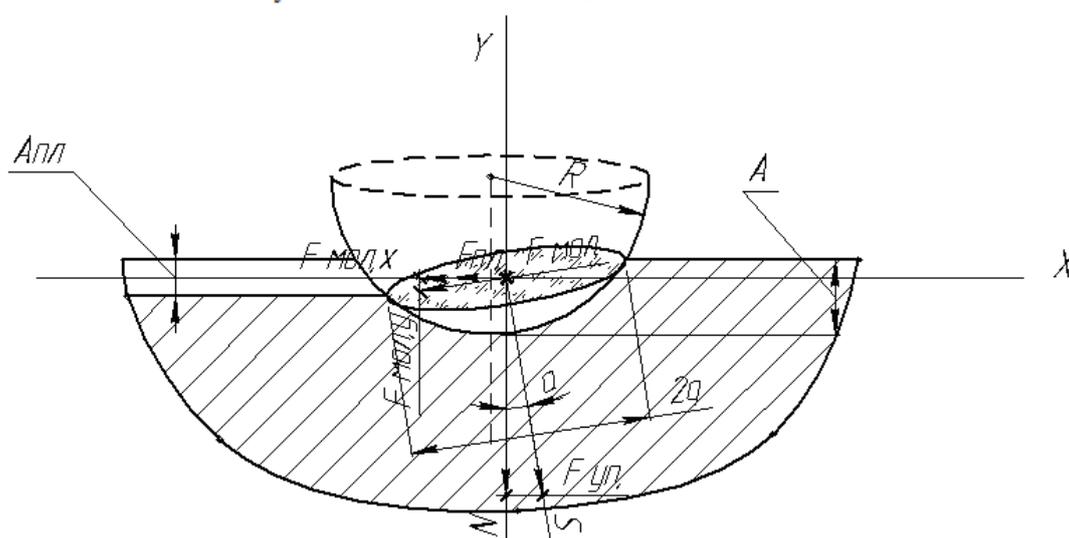


Рис. 1. Расчётная схема

Для случая $N \gg F_{\text{мол.у}}$ при условии, что зависимостью тангенциальной прочности молекулярных связей τ от нормального давления можно пренебречь [3], уравнение (1), после несложных преобразований, можно представить в виде:

$$f = \frac{\tau \pi q^2}{S} + f_{\text{пл.}} + \frac{A_{\text{пл.}S}}{2q}, \quad (2)$$

где $f_{\text{пл.}} = \frac{F_{\text{пл.}}}{N}$ – коэффициент трения пластической компоненты механической составляющей; $A_{\text{пл.}S}$ – пластическая составляющая внедрения от действия силы S .

Будем считать, что остаточная глубина дорожки трения $A_{\text{пл.}} = A_{\text{пл.}S} \cos \alpha$, а её радиус R_1 вследствие упругого восстановления при разгрузке больше радиуса индентора R . Тогда соотношение для расчёта пластической компоненты деформационной составляющей коэффициента трения $f_{\text{пл.}}$, основываясь на результатах работы [4], можно записать в виде:

$$f_{\text{пл.}} = 0,55 \sqrt{\frac{A_{\text{пл.}S} \cos \alpha}{R_1}}, \quad (3)$$

где α – угол между нормалью к сечению индентора, ограниченного областью контакта, и осью Y (рис. 1).

Используя приближённое решение задачи о внедрении жёсткого сферического индентора в упругопластическое полупространство [5] и его уточнение [6], неизвестные, входящие в соотношения (2) и (3) можно представить как:

$$q = \sqrt{R a_{\text{кр}} (k_s + \alpha \sqrt{k_s \alpha})} \quad (4)$$

$$A_{\text{пл.}S} = 0,5 a_{\text{кр}} \left(\frac{k_s}{\alpha} - \sqrt{k_s \alpha} \right) \quad (5)$$

$$R_1 = R \left(\frac{(k_s/\alpha)^{1,5}}{(k_s/\alpha)^{1,5} - k_s} \right), \quad (6)$$

где $a_{\text{кр}} = \frac{9\pi^2 R}{16} \left(\frac{HB}{E_*} \right)^2$; HB – твёрдость по Бринеллю материала упругопластического полупространства; $E_* = \frac{E}{1-\mu^2}$; E – модуль упругости материала упругопластического полупространства; μ – коэффициент Пуассона материала упругопластического полупространства; $k_s = \frac{S}{N_{\text{кр}}}$ – относительная нагрузка для силы S ; $N_{\text{кр}} = \frac{9\pi^3 R^2 HB^3}{16 E_*^2}$; α – коэффициент, определяющий отношение номинальной площади контакта к фактической.

При использовании этих выражений мы рассматриваем упругое взаимодействие сферического индентора радиусом R с остаточным отпечатком в упругопластическом полупространстве радиуса R_1 и глубиной $A_{\text{пл.}S}$ под действием силы S и считаем взаимодействие на площадке контакта квазистатическим.

Подставляя соотношения (3) – (6) в уравнение (2), после преобразований получим:

$$f = \frac{\tau}{HB} \left(1 + \frac{\alpha^{1.5}}{\sqrt{k}} \right) + 0.55 \frac{3\pi}{4\sqrt{2}} \left(\frac{HB}{E_*} \right) \sqrt{\frac{k}{\alpha} - 2\sqrt{k\alpha} + \alpha^2} + \frac{3\pi}{16} \left(\frac{HB}{E_*} \right) \frac{\frac{k}{\alpha} - \sqrt{k\alpha}}{\sqrt{k + \alpha\sqrt{k\alpha}}}, \quad (7)$$

где $k = \frac{N}{N_{кр}}$ – относительная нагрузка для нормальной составляющей N .

На рис. 2 показано сравнение расчётов по соотношению (7) с расчётами коэффициента трения модели единичной неровности в условиях упругого и пластического контакта по формулам [1], проведённое в широком диапазоне относительных нагрузок.

Расчёты по соотношению (7) и формулам работы [1] для упругого контакта ($k \leq 1$) и пластического контакта ($k > 1$) были проведены для материала, обладающего следующими физико-механическими свойствами: $\tau = 1.8 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, $E_* = 13300 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, $HB = 40 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ (медь по данным [1, 7]). Для описания α , при расчётах по соотношению (7), использовались результаты работы [6], учитывающие выпучивание материала полупространства при статическом упругопластическом контакте. Как видно из представленных данных, результаты расчётов по соотношению (7) при $k > 0.05$ несколько превосходят значения, получаемые при применении формул работы [1] и незначительно меньше их при меньших значениях относительной нагрузки. Несмотря на более сложный вид, соотношение (7) описывает зависимость коэффициента трения от нагрузки одной непрерывной функцией и требует для расчётов меньше экспериментально получаемых физико-механических свойств материалов, чем формулы работы [1]. Отметим, что для приведённых выше физико-механических свойств меди при внедрении сферического индентора радиусом 1 мм при изменении относительной нагрузке в диапазоне от 5×10^{-3} до 1×10^4 (как представлено на рис. 2) нормальная нагрузка будет изменяться от 0,03 г до 63 кг соответственно. Провести экспериментальные исследования изменения коэффициента трения от относительной нагрузки в таком диапазоне для одного материала затруднительно, поэтому рассмотрим доступные из литературы экспериментальные результаты для различных материалов и размеров инденторов.

На рис. 3 представлено сопоставление расчётов по соотношению (7) с экспериментальными данными по зависимости коэффициента трения меди от её твёрдости [4]. Здесь пунктиром показаны результаты расчётов по соотношению (7) для значений твердости HB от 10 до $100 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ при $\tau = 1.8 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, $E_* = 13300 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ [1, 7], а сплошной – при $\tau = 5.4 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$. Как видно из приведённых данных, завышение τ в 3 раза по сравнению со справочным значением даёт более точное соответствие экспериментальным данным (точки). Причины этого проанализируем позже после рассмотре-

ния всех экспериментов. Отметим, что эксперименты проводились при трении стального индентора $R = 1$ мм при нормальной нагрузке 1 кгс. Для этих условий относительная нагрузка k изменялась от 1270 (при $HB = 20 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$) до 14 (при $HB = 90 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$). Экспериментальные данные зеркально соответствуют по характеру кривой на рис. 2 для аналогичных относительных нагрузок.

На рис. 4 представлены экспериментальные данные зависимости коэффициента трения стального индентора по меди от нагрузки, также представленные в [4], в сопоставлении с расчётами по соотношению (7).

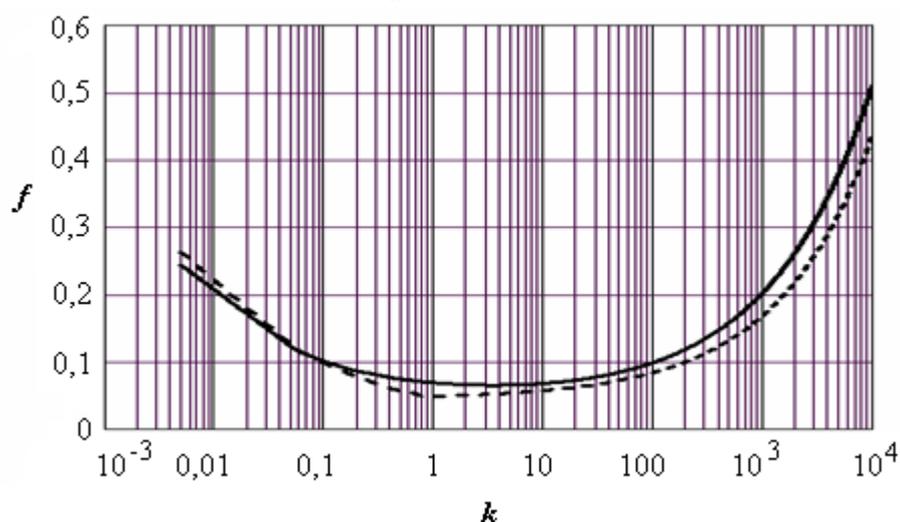


Рис. 2. Расчет коэффициента трения по соотношению (7) (сплошная линия) и по формулам [1] (пунктир)

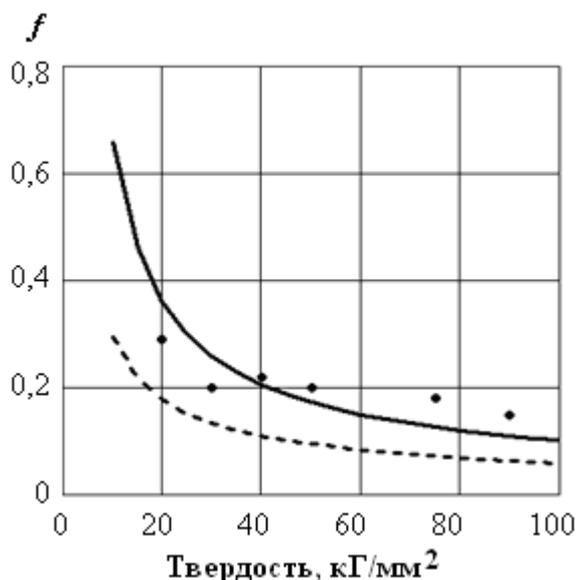


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения меди от её твёрдости

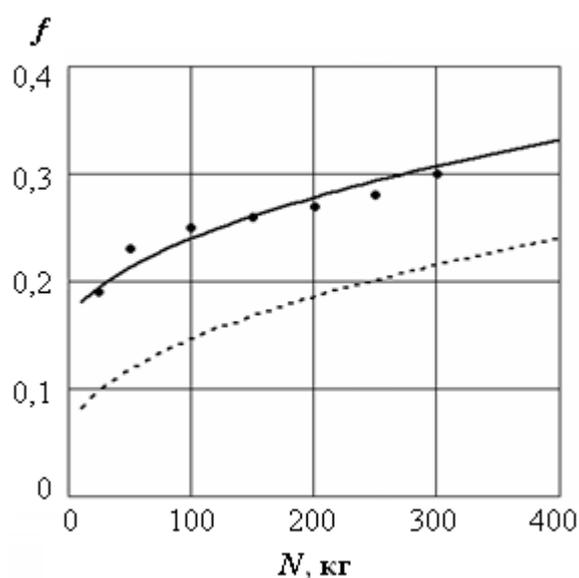


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения меди от нагрузки

Здесь, также, как и на рис. 3, пунктиром показаны результаты расчётов по соотношению (7) для значений $HB = 40 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ при $\tau = 1.8 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, $E_* = 13300 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ [1, 7], а сплошной – при $\tau = 5.4 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$. Как видно, и в этом случае завышение значения τ в 3 раза даёт более точное соответствие экспериментальным данным (точки). Данные эксперименты проводились для сферического индентора $R = 6,35$ мм и нормальные нагрузки соответствовали диапазону относительных нагрузок от 100 до 1200. Отметим, что проведённые расчёты коэффициента трения сферического индентора по формулам для пластического контакта [1, 4] начинают удовлетворять приведённым экспериментальным данным при ещё большем увеличении значения τ , что соответствует разнице в расчётах, показанной на рис. 2.

Для дальнейшей экспериментальной проверки соотношения (7) при меньших значениях относительной нагрузки воспользуемся результатами работы [8], в которой проводились исследования коэффициента трения различных материалов на микротрибометре при сверхнизких нагрузках. В качестве индентора использовалась корундовая игла с радиусом закругления при вершине 0,05 мм. Авторами представлены полные данные о физико-механических свойствах всех испытанных образцов. На рис. 5 представлено сопоставление результатов расчётов по соотношению (7) с экспериментальными данными для золота.

Здесь также пунктиром показаны результаты расчётов по соотношению (7) для золота ($HB = 47 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, $\tau = 4,6 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, $E_* = 9166 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ [8]), а сплошной линией – при $\tau = 5.98 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$. Как видно, в этом случае значения τ было увеличено на 30% по сравнению с данными авторов и это более точно описало экспериментальные данные (точки). Относительная нагрузка в этих экспериментах изменялась от 1 до 12. Отметим, что при расчётах по соотношению (7) изменения α учитывались по тем же зависимостям, что и для меди в связи с отсутствием в [6] расчётов α с использованием МКЭ для золота.

На рис. 6 представлено сопоставление расчётов по соотношению (7) с экспериментальными данными для циркония. На рисунке пунктиром показаны результаты расчётов по соотношению (7) для циркония ($HB = 163 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, $\tau = 5,6 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, $E_* = 10890 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ [8]), а сплошной линией – при $\tau = 11,2 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$. В этом случае значения τ было увеличено в 2 раза по сравнению с данными авторов, чтобы точнее описать экспериментальные результаты (точки). Относительная нагрузка здесь изменялась от 0,3 до 3,75. Отметим, что при расчётах по соотношению (7) изменения α учитывались по тем же зависимостям, что и для меди в связи с отсутствием в [6] расчётов α с использованием МКЭ для циркония.

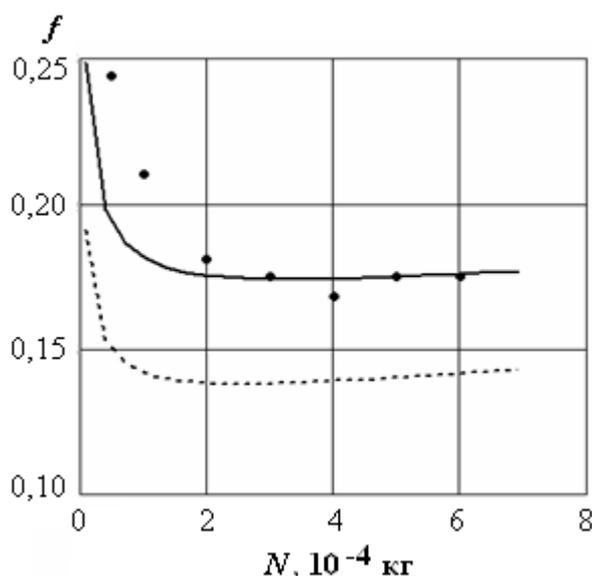


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от нагрузки для золота

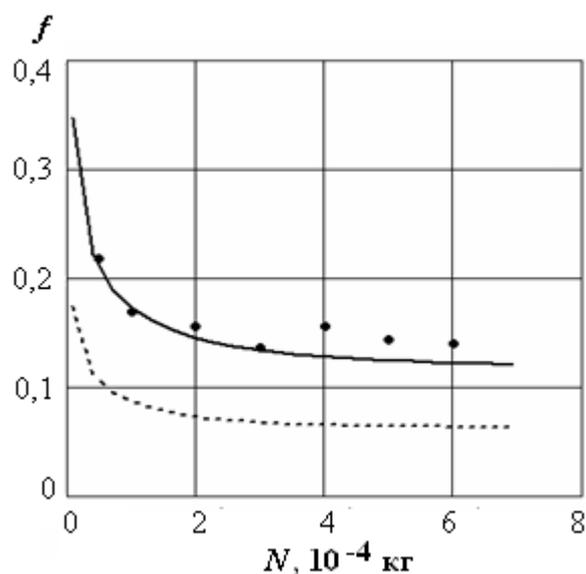


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от нагрузки для циркония

Как видно из результатов расчётов по соотношению (7), удовлетворительное соответствие с приведёнными экспериментами имеет место только при увеличении значений τ по сравнению со значениями, полученными другими исследователями во всём диапазоне изменения относительных нагрузок. Это связано как с методикой экспериментального определения этой величины, так и с погрешностями предлагаемой модели. Уточнение этого вопроса будет содержанием дальнейших исследований. Однако, предлагаемая модель является более развитой, чем ранее предлагавшиеся [1, 4], т.к. она охватывает более широкий диапазон нагрузок, не требует дополнительного учёта гистерезисных потерь при расчёте коэффициента трения в условиях упругого контакта и коэффициента упрочнения тангенциальной прочности молекулярных связей. Для прогнозирования зависимости коэффициента трения от нагрузки достаточно измерить твёрдость материала и по результатам экспериментов по определению коэффициента трения при одной нагрузке рассчитать значение τ для конкретной пары трения. Это важно для расчётно-экспериментальных методов оценки фрикционных характеристик материалов работающих при заданных условиях эксплуатации (температура, смазка, среда, режимы). В этих случаях справочные данные часто отсутствуют, а проведение большого количества экспериментов на различных установках затруднительно.

В заключение выражаю благодарность д.т.н. профессору В.В. Измайлову за предоставленные экспериментальные данные и консультации.

Библиографический список

1. Крагельский, И.В. Основы расчётов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

2. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. М.: Наука, 2001. 478 с.
3. Михин, Н.М. Исследование тангенциальной прочности адгезионной связи / Н.М. Михин, К.С. Ляпин, М.Н. Добычин // Контактное взаимодействие твёрдых тел и расчёт сил трения и износа: Сборник научных трудов. М.: Наука, 1971. С. 53–60.
4. Михин, Н.М. Внешнее трение твёрдых тел / Н.М. Михин. М.: Наука, 1977. 222 с.
5. Нетягов, П.Д. Упругопластический контакт единичной неровности / П.Д. Нетягов, В.В. Измайлов // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1975. № 5. С. 16–20.
6. Болотов, А.Н. Исследование упругопластических контактных деформаций металлов применительно к процессам фрикционного взаимодействия / А.Н. Болотов, О.В. Сутягин, М.В. Васильев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4(3). С. 977–981.
7. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978. Кн. 1. 400 с.
8. Измайлов, В.В. Исследование трения металлов и неметаллов на микроструктурном уровне / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, М.П. Вильмс // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твёрдых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2011. Вып. 4. С. 38–46.

УДК 621.891

И.И. Беркович, Ю.И. Морозова

Тверской государственной технической университет

ФРИКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТА ВОЛОКОН, ТКАНЫХ И СПЛОШНЫХ ЛЕНТ

Получены соотношения для расчета фактической площади контакта и параметров структуры контакта волокон, тканых и сплошных лент. Предложены аналитические зависимости для расчета силы трения. Соотношения учитывают влияние на трение силовых и геометрических факторов, строения граничного слоя и физико-механических свойств.

Ключевые слова: фактическая площадь контакта, фрикционные характеристики контакта, волокна, тканые сплошные ленты, сила трения

FRICIONAL CHARACTERISTICS OF A CONTACT OF FIBERS, WOVEN AND SOLID BELTS

The expressions for the calculation of a real contact area and structural parameters of a contact of fibers, woven and solid belts have been obtained. The formulae for a friction force calculation have been proposed. These formulae take into account the influence of a force and geometry, boundary layer structure and physical and mechanical characteristics of materials.

Key words: real contact area, frictional contact characteristics, woven and solid belts, friction force.

Контакт волокон с твердой поверхностью

Фактическая площадь контакта волокон. К числу дисперсных материалов (ДМ) относятся волокнистые структуры в виде простых и сложных волокон. Так же, как и в случае контакта шарообразных частиц с твердой

поверхностью, считая поверхности элементарного волокна и контртела достаточно гладкими, можно при расчете фактической площади контакта (ФПК) пренебречь влиянием шероховатости.

Схема площадей контакта волокон разной сложности представлена на рис. 1. Очертания площадок контакта в целях упрощения расчета будем считать прямолинейными. Волокно Б сложено из элементарных волокон А, а волокно В сложено из прядей типа Б. Условимся называть волокна А, Б, В волокнами 1-го, 2-го, 3-го порядка сложности. Аналогичным образом можно было бы изобразить и волокна еще более высокой сложности. Как это видно из рисунка, с усложнением строения волокна усложняется и строение контурной площади контакта, в пределах которой заключены площадки фактического контакта, поэтому можно аналогично с понятием «степень сложности волокна» ввести понятие «степень сложности контурной площади контакта».

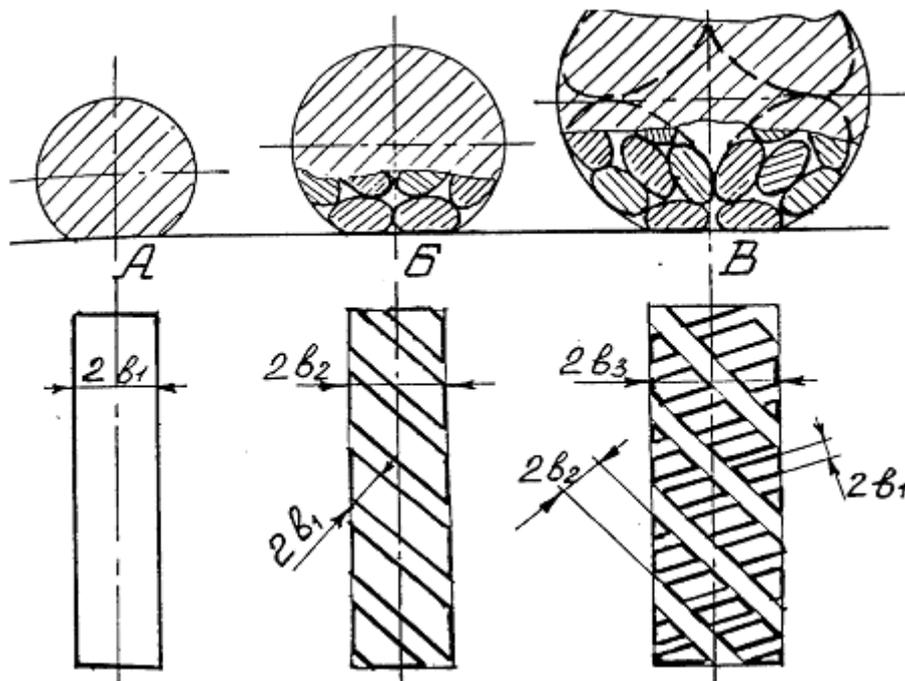


Рис. 1. Схема контакта волокон

Рассмотрим упругий контакт элемента волокна 1-го порядка сложности (моноволокна) с плоской поверхностью. По формуле Герца [1] фактическая площадь контакта равна

$$A_{r1} = 2K(QD_1\Delta L_1 j)^{1/2},$$

где K – константа; j – упругая постоянная; D_1 , ΔL_1 – диаметр и длина волокна; Q – нормальное усилие.

Перейдем к ФПК волокна 2-го порядка сложности (см. схему Б на рис. 1). Площадки контакта наклонены по отношению к направлению, перпендикулярному к оси волокна, на угол подъема внешних моноволокон

(угол скручивания волокна). Если все площадки контакта вытянуть в одну линию, то протяженность этой линии

$$\Delta L_1^* \cong 2b_2 \Delta L_2 D_1^{-1}.$$

Теперь ФПК волокна 2-го порядка сложности можно представить как площадь контакта 1-го порядка протяженностью ΔL^* , прижатой к плоскости нормальной нагрузкой, действующей на волокно 2-го порядка:

$$A_{r2} = 2K(QD_1 \Delta L_1^* j_1)^{1/2} = 2K(2Qb_2 \Delta L_2 j_1)^{1/2}.$$

Будем считать сложное волокно как упругое цилиндрическое тело, обладающее собственным модулем упругости и коэффициентом Пуассона. Исходя из этого, можно выразить контурную площадь волокна 2-го порядка сложности, представляя ее в форме прямоугольника, с помощью формулы Герца:

$$2b_2 \Delta L_2 = 2K(QD_2 \Delta L_2 j_2)^{1/2}.$$

Рассматривая совместно последние две формулы, выражаем фактическую площадь контакта для волокна 2-го порядка сложности:

$$A_{r2} = (2K)^{3/2} Q^{3/4} (D_2 \Delta L_2 j_2)^{1/4} j_1^{1/2}.$$

Рассуждая аналогично, можно получить формулы для расчета ФПК волокон 3-го и 4-го порядков сложности:

$$A_{r3} = (2K)^{7/4} Q^{7/8} (D_3 \Delta L_3 j_3)^{1/8} j_2^{1/4} j_1^{1/2}.$$

$$A_{r4} = (2K)^8 Q^{15/16} (D_4 \Delta L_4 j_4)^{1/16} j_3^{1/8} j_2^{1/4} j_1^{1/2}.$$

Обобщая изложенное на произвольный порядок сложности волокна (i), получаем формулу для расчета ФПК волокон в общем виде:

$$a_r = (2K)^{2-0,5^{i-1}} q_{II}^{1-0,5^i} \cdot D^{0,5^i} \prod_1^i j_z^{0,5^z} = Gq_{II}^{1-0,5^i}. \quad (1)$$

Здесь a_r – площадь контакта на единице длины волокна; q_{II} – погонная нагрузка.

Влияние степени сложности волокна на показатели степени у величин, входящих в формулу (1), показано в табл. 1

Таблица 1. Влияние степени сложности волокна на показатели степени в формуле (1)

I	1	2	3	4	5	6	7	8
$1-0,5^i$	0,5	0,75	0,875	0,9375	0,9687	0,9844	0,9922	0,9961
$0,5^i$	0,5	0,25	0,125	0,0625	0,0312	0,0156	0,007 81	0,003 91

Как показывают данные таблицы, с ростом степени сложности волокна показатель степени у нагрузки стремится к единице, и, начиная с 5-й степени сложности, можно считать, что ФПК прямо пропорциональна нагрузке. Одновременно снижается влияние диаметра волокна и упругих постоянных, составляющих волокно сложных прядей. Наибольшее влияние оказывают упругие постоянные составляющих элементов 1, 2, 3, 4 поряд-

ков сложности. Перечисленные особенности формирования контакта сложных волокон определяют закономерности их трения

При скольжении волокна по плоской поверхности, если известна нормальная нагрузка, действующая в расчете на единицу длины (погонная нагрузка), зависимость погонной силы трения и коэффициента трения от погонной нагрузки выражается с учетом (1), в виде

$$\left. \begin{aligned} f_{II} &= \tau_0 G q_{II}^{1-0,5^i} + \beta q_{II}, \\ \mu &= \tau_0 G q_{II}^{-0,5^i} + \beta. \end{aligned} \right\} \quad (1a)$$

Эти соотношения определяют закономерности трения волокон в условиях упругого контакта.

Контакт сплошных и тканых лент с твердой поверхностью

Фактическая площадь контакта тканых лент. Основываясь на описанных в предыдущем разделе закономерностях контактирования сложных волокон, представляется возможность определения характеристик фрикционного контакта простых тканых структур в виде лент [2].

Рассмотрим контакт простейшей тканой структуры с твердой поверхностью, схема которого представлена на рис. 2а. Площадки контакта образуются в результате смятия тороидальных элементов нитей, возникающих в результате их переплетения, и имеющих форму эллипса. Если структура состоит из сложных нитей, то в пределах эллиптической

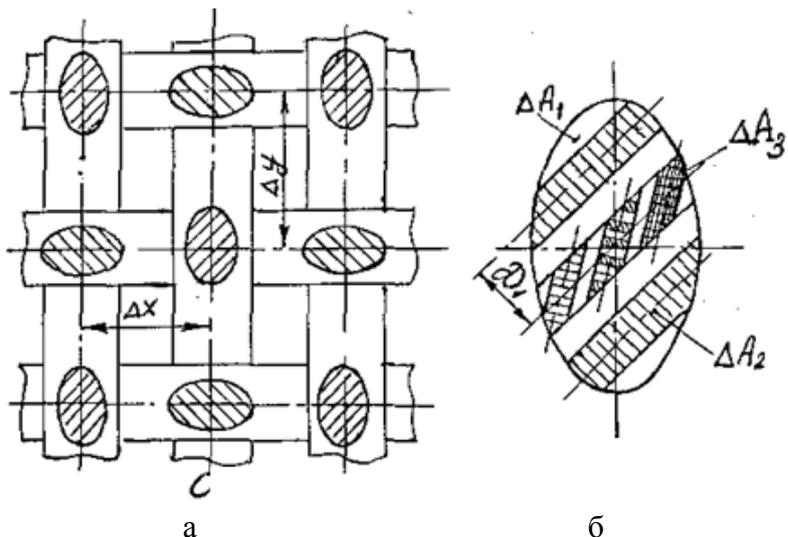


Рис. 2. Схема контакта тканой структуры:

а – контакт структуры из монопитей;

б – строение площадки контакта сложной нити

площадки будут наблюдаться пятна контакта составных частей нити разного порядка сложности (рис. 2б). Число площадок контакта (рис. 2а) равно числу элементарных ячеек:

$$m_k = A_a / \Delta A_a = A_a / \Delta x \Delta y.$$

Если ткань выполнена из нитей первого порядка сложности, то по формуле Герца

$$\Delta A_{r1} = \pi a b = 4,11 n_a (Q / E_{1n} k_T m_k)^{2/3}, \quad (2)$$

где n_a – коэффициент, зависящий от отношения полуосей площадки контакта; k_T – кривизна тороида; E_{1n} – приведенный модуль упругости.

Если тканая структура состоит из волокон первого порядка сложности, то площадь контакта

$$A_{r1} = \Delta A_{r1} m_k.$$

Если ткань выполнена из составных нитей, то при расчете фактической площади контакта необходимо учесть строение нити и физико-механические характеристики элементов структуры. В первом приближении нить и ее элементы можно считать упругими цилиндрами.

Рассмотрим контакт нити второго порядка сложности: нить свита из моноволокон. В пределах эллиптической площадки контакта сложного волокна (ΔA_1) будут наблюдаться полосы контакта от моноволокон – ΔA_2 (см. рис. 2б). Площадь фактического контакта можно рассчитать, определив общую длину контакта моноволокон. При этом считаем, что нормальная нагрузка прижимает к плоскости одно волокно такой длины.

Длина контакта всех моноволокон:

$$L_1 = m_k \Delta A_{r1} / d_1 = A_{c1} / d_1, \quad (3)$$

где A_c – контурная площадь контакта.

Фактическая площадь контакта такого моноволокна рассчитывается, как и в разделе 1, по формуле Герца для взаимодействия цилиндра и плоскости:

$$A_{r2} = 1,6(Qd_1 \Delta L_1 E_{1n}^{-1})^{1/2}. \quad (4)$$

Подставляя сюда выражения (2), (3) и (4), получаем формулу для расчета площади контакта для ткани из нитей второго порядка сложности:

$$A_{r2} = 1,6(4,11n_a)^{1/2} Q^{5/6} m_k^{1/6} k_T^{-1/3} E_{1n}^{-1/2} E_{2n}^{-1/3}.$$

ФПК представляет собой совокупность полосок, возникающих в результате смятия моноволокон (нитей первого порядка сложности). В этом случае имеется два вида контурной площади контакта A_{c2} и A_{c3} . Первая образована в результате контакта нитей второго порядка сложности, а вторая – в результате контактирования тороидальных элементов самой нити. Контурную площадь контакта A_{c2} можно выразить из (3), считая в данном случае, что ФПК нити второго порядка сложности является контурной площадью контакта нити третьего порядка сложности.

Общая протяженность полосок фактического контакта

$$L_2 = A_{r2} / d_1.$$

Используя формулу (4), получаем:

$$A_{r3} = 1,6^{3/2} (4,11n_a)^{1/4} Q^{11/12} m_k^{1/12} k_T^{-1/6} E_{1n}^{-1/2} E_{2n}^{-1/4} E_{3n}^{-1/6}.$$

Далее, обобщая полученные результаты на ленты из нитей произвольного порядка сложности, выразим ФПК:

$$A_{ri} = \frac{(1,6)^{2-0,5^{i-2}} (4,11n_a)^{0,5^{i-1}} m_k^{3^{-1}0,5^{i-1}} Q^{1-3^{-1}0,5^{i-1}}}{(k_T E_{ni})^{3^{-1}0,5^{i-2}} \prod_1^{i-1} E_{jn}^{0,5^j}} \quad (5)$$

Пользуясь полученным соотношением, нетрудно проследить, как меняются показатели степени у факторов, определяющих ФПК, тканой лент, с усложнением нити. Данные представлены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние геометрических и физико-механических показателей параметров контакта на ФПК

Показатели	Порядок сложности нити					
	1	2	3	4	5	6
Степень						
Нормальная нагрузка	2/3	5/6	11/12	23/24	47/48	95/96
Кривизна тороидального элемента нити	2/3	1/3	1/6	1/12	1/24	1/48
Число ячеек	1/3	1/6	1/12	1/24	1/48	1/96
Упругая постоянная	2/3	1/3	1/6	1/12	1/24	1/48

Как видно из табл. 2, с усложнением нити показатель степени у нагрузки стремится к единице, снижается влияние на величину ФПК и других указанных в таблице факторов. Необходимо отметить снижение влияния на ФПК номинальной площади контакта, которой пропорционально число ячеек m . В произведении приведенных модулей упругости преобладает первый сомножитель, характеризующий модули упругости контактирующих материалов. Этот сомножитель на несколько порядков превышает остальные. Кроме того, у него наибольший показатель степени.

Связь между силами натяжения в ветвях тканой ленты, скользящей по цилиндрической поверхности.

Номинальная площадь контакта:

$$dA_a = bRd\varphi, \quad (6)$$

где b – ширина тканой ленты.

Выразим фактическую площадь контакта элемента:

$$dA_{ri} = B_5 dQ^\gamma dA_a^{1-\gamma}, \quad (7)$$

где B_5 – коэффициент, включающий соответствующие сомножители из формулы (6).

Используя соотношения, приведенные в работе [5], получим

$$dT/d\varphi = \tau_0 B_5 (Rb)^{1-\gamma} T^\gamma + \beta T = B_6 T^\gamma + \beta T. \quad (8)$$

Решение этого уравнения дает связь между силами натяжения в набегающей и сбегающей ветвях тканой ленты, скользящей по цилиндрической направляющей поверхности:

$$T_2 = [(B_6/\beta + T_1^{1-\gamma}) \exp\{\beta(1-\gamma)\varphi\} - B_6/\beta]^{1-\gamma}. \quad (9)$$

Здесь

$$\gamma = 1 - 3^{-1} 0,5^{i-1}.$$

$$B_6 = \tau_0 (Rb/\Delta A_a)^{1-\gamma} 1,6^{2-0,5^{i-2}} (4,11)^{0,5^i} / [(k_T E_{ni})^{2(1-\gamma)^{i-1}} \prod_1^{i-1} E_{jn}^{0,5^j}].$$

Если показатель степени γ приближается к единице, то фактическая площадь контакта пропорциональна нормальной нагрузке. Коэффициент трения не зависит от нагрузки (закон Амонтона), и соотношение (9) переходит в формулу Эйлера. Это возможно, если волокна имеют порядок сложности более четвертого. Кроме того, такое наблюдается, когда мала величина удельной адгезии.

Библиографический список

1. Бхушан, Б. Температура поверхности раздела магнитная головка – среда / Б. Бхушан // Проблемы трения и смазки: Труды Американского общества инженеров-механиков, 1988. № 1. С. 36-49.
2. Беркович, И.И. О некоторых закономерностях трения лент / И.И. Беркович, Ю.И. Морозова // Триботехника машиностроения: тезисы докл. II Всесоюзной конф., Пушино на Оке. М.: ИМАШ, 1983. С. 200–201.
3. Беркович, И.И. Фрикционные характеристики контакта волокон с твердой поверхностью / И.И. Беркович, Ю.И. Морозова // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: Межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТГТУ, 2011. Вып. 4. С.90-92.

УДК 621.941.1-539.538

М.Ш. Мигранов

Уфимский государственный авиационный технический университет

ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТОЧЕНИИ

Обсуждается возможность применения принципов термодинамики неравновесных процессов к описанию изнашивания режущего инструмента. Получено уравнение, позволяющее прогнозировать интенсивность изнашивания режущего инструмента на стадии технологической подготовки производства.

Ключевые слова: режущий инструмент, интенсивность изнашивания, неравновесная термодинамика.

WEAR RATE OF A CUTTING TOOL AT A NONSTATIONARY TURNING

A possibility of an application of nonequilibrium thermodynamics principles to description of a cutting tool wear is discussed. The equation for the forecasting of cutting tool wear rate in a stage of a preproduction engineering has been obtained.

Key words: cutting tool, wear rate, nonequilibrium thermodynamics.

В машиностроительном производстве большое место занимают операции с многоинструментальной наладкой, многопереходная обработка, обработка сложных контуров по копиру, вибрационное и прерывистое резание, обработка на станках системами ЧПУ и АУ, т.е. обработка с переменными элементами режима резания и, как следствие этого, с нестационарностью нагружения режущего инструмента. Особенно остро проблема

повышения эффективности процессов нестационарного резания возникает при чистовой и получистовой обработке деталей силовой части газотурбинного двигателя, изготавливаемых из жаропрочных и коррозионностойких сталей и сплавов. Обработка этих деталей из-за высокой температурно-силовой нагруженности и сложной формы имеет следствием высокий уровень износа инструмента, малую производительность и низкую экономичность эксплуатации дорогостоящих станков с ЧПУ и обрабатывающих центров, в последнее время оснащенных адаптивными системами управления (АДСУ) и обычно используемых для данного класса изделий. Поэтому минимизация интенсивности износа инструмента, а в целом оптимизация и назначение рациональных режимов обработки в условиях нестационарного течения является актуальной задачей.

На основе принципов термодинамики неравновесных процессов такое динамичное и необратимое явление, как изнашивание, можно наиболее полно описать с помощью так называемых диссипативных функций, представляющих собой скорость изменения энергии, затрачиваемой на какой-либо процесс, отнесенную к единице площади контакта, используя гипотезу о независимости удельной энергии разрушения от вида подводимой энергии [4]. Конкретизация составляющих уравнения энергетического баланса дает зависимость для определения интенсивности износа режущего инструмента, учитывающую переменность элементов режима резания и, как следствие, температурно-силовых условий в виде:

$$I_h = \frac{P_z(\tau) \cdot v_i \cdot \mu}{(\ell_1 + c) \cdot b - 0,186 \cdot \theta(\tau) \cdot I_d \cdot I_\theta} \cdot v_i \cdot \left(\frac{HV_u}{HV_\phi} \right)^\alpha \cdot erf P \cdot \left(\rho_r + \frac{12 \cdot (1 + \mu)}{E} \cdot G_m^2 \right), \quad (1)$$

где $P_z(\tau)$, v_i , $\theta(\tau)$ – соответственно текущие значения тангенциальной составляющей силы, скорости и температуры резания; μ – коэффициент трения; ρ_r – удельная нагрузка; $\ell_1 + c$ – длина контакта по передней поверхности инструмента; $\frac{HV_u}{HV_\phi}$ – отношение микротвердостей инструментального и обрабатываемого материалов; α – поправочный коэффициент; G_m , E – соответственно предел текучести и модуль упругости обрабатываемого материала; $Erf P$ – вероятность отделения частицы износа инструментального материала; b – ширина срезаемого слоя.

Для решения задачи по определению и минимизации интенсивности износа инструмента по зависимости (1) существует ряд способов, основанных на методах вариационного исчисления [1]. Один из них заключается в определении интенсивности износа инструмента в неявном виде. К сожалению, указанный способ дает решение в виде бесконечного функционального ряда, коэффициенты которого переменны для различных условий

обработки, что весьма затрудняет процесс поиска минимума в производственных условиях.

Более сложный и точный способ [2], по сравнению с предыдущим, основан на допущении, что интенсивность износа инструмента стремится к нулю и решении относительно выбранного параметра (скорости, температуры и силы резания, износа по задней поверхности режущего инструмента и т.д.) с учетом переменности каждого из них во времени. Данная система уравнений включает как внешние, так и внутренние взаимозависимые и взаимообусловленные переменные и результаты решения уравнения (1) получаются крайне сложными, к тому же носящими частный характер и не позволяющими определить условия минимизации интенсивности износа в реальных условиях с достаточной точностью.

В целом, из анализа возможных математических методов решения задачи по минимизации интенсивности износа инструмента при нестационарном течении и работ по оптимизации лезвийной обработки резанием [3] следует, что в данном случае, по-видимому, наиболее приемлемо решение с учетом допущений и упрощений на основе уточнения составляющих зависимости (1) по результатам экспериментальных исследований температурно-силовых условий, контактных процессов, формоустойчивости режущего клина, его изнашивания и особенностей суммирования износа при переменности скорости резания, причем с определенным темпом во времени. Исходя из этого, получена зависимость вида:

$$\frac{P_z(\tau) \cdot v_i \cdot \mu}{(\ell_1 + c) \cdot b} = C_\theta \cdot \theta(\tau), \quad (2)$$

где C_θ – поправочный коэффициент при температуре резания.

Решение данного уравнения относительно темпа изменения скорости резания, а также экстремальный характер зависимости его от интенсивности износа инструмента, температуры и силы резания при нестационарном течении позволяет:

- обеспечить минимизацию интенсивности износа режущего инструмента за счет обработки при оптимальном темпе изменения скорости резания;
- осуществлять переходный процесс от одного режима к другому в благоприятных условиях с точки зрения изнашивания;
- прогнозировать интенсивность износа инструмента на стадии технологической подготовки производства для станков с ЧПУ и АдСУ, работающих в режиме стабилизации температуры и силы резания;
- форсировать лезвийную обработку резанием за счет изменения скорости резания.

Библиографический список

1. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов. М.: Наука., 1973. Т. 1. 631 с.
2. Гмошинский, В.Г. Инженерное прогнозирование / В.Г. Гмошинский. М.: Энергоиздат, 1982. 205 с.

3. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

4. Постнов, В.В. Процессы на контактных поверхностях, износ режущего инструмента и свойства обработанной поверхности / В.В. Постнов, Б.У. Шарипов, Л.Ш. Шустер. Свердловск: Изд. УПИ, 1988. 221 с.

УДК 621.9

А.М. Мигранов

Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина
М.Ш. Мигранов

Уфимский государственный авиационный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния кинематической вязкости смазок на износостойкость режущего инструмента, температуру и силы резания при точении и сверлении нержавеющей стали 12X18H10T. Показано, что зависимость интенсивности изнашивания режущего инструмента от кинематической вязкости при оптимальной скорости резания как при точении, так и при сверлении имеют характерные минимумы. Это позволяет говорить о существовании оптимального значения кинематической вязкости.

Ключевые слова: смазка, кинематическая вязкость, интенсивность изнашивания, режущий инструмент.

THE INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CUTTING EMULSION VISCOSITY ON TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF IT

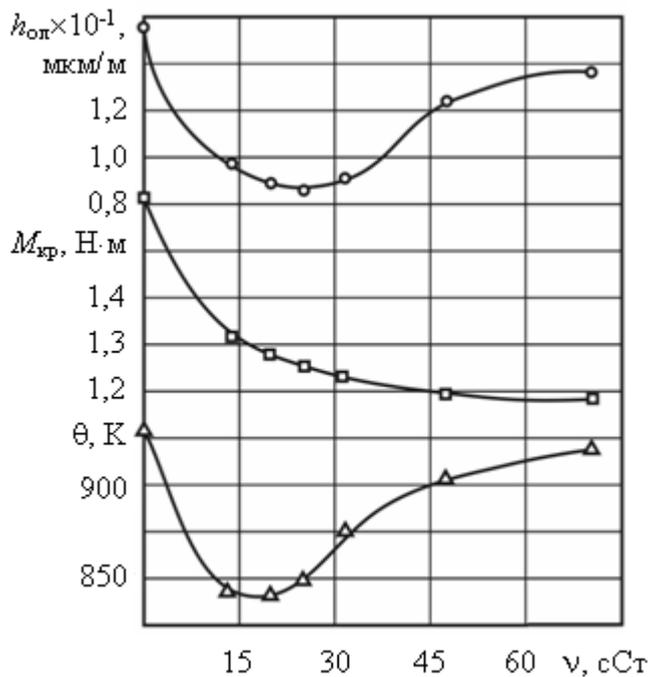
The influence of lubricant kinematic viscosity on a cutting tool wear rate, temperature and cutter force in turning and drilling of the stainless steel 12X18H10T has been investigated. The results of the investigation show that dependences of cutting tool wear rate on lubricant kinematic viscosity at the optimal cutting speed have typical minimums both in turning and drilling. This fact enables to indicate the optimal value of the kinematic viscosity.

Key words: lubricant, kinematic viscosity, wear rate, cutting tool.

Процессы обработки металлов резанием в современном машиностроении характеризуются исключительным многообразием условий, вызванным обширной номенклатурой обрабатываемых и инструментальных материалов, спецификой конкретных операций и оборудования, характером и масштабом производства. При этом наиболее слабым звеном технологического процесса является режущий инструмент, который подвергается значительному температурно-силовому воздействию и, как следствие, интенсивно изнашивается. Масляные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) оказывают глубокое и многостороннее влияние на физические и химические процессы, происходящие при резании металлов и при обработке методами пластического деформирования. Долгое время считалось, что СОЖ

при резании применяются в целях, главным образом, обеспечения охлаждения инструмента и обрабатываемого материала. Однако, анализ производственного опыта, экспериментальных исследований и теоретического рассмотрения вопроса позволяет заключить, что в большинстве случаев более важным является смазочное действие [1].

В настоящее время, наряду с разработкой новых марок СОЖ и присадок к ним, актуальной проблемой является исследование влияния физико-механических свойств, в частности, кинематической вязкости масляных СОЖ на их триботехнические характеристики при обработке металлов резанием.



Влияние кинематической вязкости СОЖ «Росойл – 101» на интенсивность износа режущего инструмента и крутящий момент при сверлении стали 12Х18Н10Т – Р6М5 ($n = 1250$ об/мин; $S = 0,07$ мм/об; $d = 9$ мм)

(рисунок). Это позволяет говорить о существовании оптимального значения кинематической вязкости.

Зависимость уровней температуры и силы резания от кинематической вязкости при оптимальной скорости резания при точении носит экстремальный характер для температуры и немонотонно убывающий для силы резания.

Библиографический список

1. Латышев, В.Н. Повышение эффективности СОЖ / В.Н. Латышев. М.: Машиностроение, 1985. 64 с.
2. Латышев, В.Н. Трибология резания. Кн.1: Фрикционные процессы при резании металлов / В.Н. Латышев. Иваново: ИвГУ, 2009. 108 с.

В данной работе были проведены серии экспериментальных исследований влияния кинематической вязкости смазок различных марок на износостойкость режущего инструмента, температуру и силы резания при точении и сверлении нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Результаты показали, что зависимость пути резания от скорости носит экстремальный характер и максимум соответствует различным значениям кинематической вязкости. Причем зависимость интенсивности износа режущего инструмента от кинематической вязкости при оптимальной скорости резания как при точении, так и при сверлении имеют свои характерные минимумы

УДК 621.891

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, М.В. Мардян
Тверской государственной технической университет

КОМПЛЕКТ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОДИСПЕРСНЫХ МАГНИТНЫХ СРЕД. Часть 1

Приведены конструкции оборудования и методики исследования реологических, коррозионных свойств, а также коллоидной стабильности нанодисперсных магнитных сред, в частности магнитных жидкостей с антифрикционными добавками.

Ключевые слова: нанодисперсные магнитные среды, магнитные жидкости, реологические свойства, коррозионные свойства, коллоидная стабильность.

A SET OF EQUIPMENT FOR THE INVESTIGATION OF PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF NANODISPERSE MAGNETIC MATTERS. PART 1

A set of scientific equipment and methods for the evaluation of rheological and corrosive characteristics of nanodisperse magnetic matters is described. In addition, the equipment and the methods for the determination of a colloid stability of nanodisperse magnetic matters, particularly magnetic fluids with antifriction additives, are proposed.

Key words: nanodisperse magnetic matters, magnetic fluids, rheological properties, corrosive properties, colloid stability.

Создание нанодисперсных магнитных сред и, в частности, магнитных жидкостей (МЖ) открыло принципиально новые перспективы в области нанотриботехники. В машино- и приборостроении имеется большое количество трибосопряжений, надежность которых можно существенно повысить с помощью МЖ [1–3]. Общая черта этих узлов заключается в том, что они работают при разовой заправке лимитированным объемом масла. Перспективность применения МЖ в узлах трения в основном объяснялась возможностью ее подачи и удержания в зоне контакта под действием магнитного поля. Однако уже первые результаты изучения смазочных свойств МЖ показали, что уровень их значительно ниже, чем у аналогичных по назначению масел.

В частности, роль дисперсионной фазы МЖ при трении оказалась негативной. Более того, попытки применения МЖ в узлах трения, работающих преимущественно в граничном режиме смазывания, например, в шестеренчатых передачах, подшипниках скольжения, показали техническую и экономическую сложность реализации даже основного преимущества МЖ – магнитоуправляемости. Для удержания МЖ в узлах трения потребовалось создавать большие магнитные поля сложной топографии.

Таким образом, задача эффективного применения МЖ для смазки трибосопряжений оказалась не такой тривиальной, как представлялось первоначально, и требуются серьезные исследования для ее решения. Во-первых,

необходимо на основе исследования физико-химических свойств магнитных жидкостей создать магнитные масла (ММ) с нанодобавками, отличающиеся от магнитных жидкостей в первую очередь наличием хороших смазочных свойств. Во-вторых, требуется выявить рациональные методы применения инновационных магнитных масел в узлах трения. В данной работе приведены конструкции оборудования и методики исследования физико-химических свойств магнитных масел и магнитных жидкостей.

Магнитный вискозиметр. Для исследования реологических свойств магнитных жидкостей и масел разработана конструкция ротационного вискозиметра, схема измерительного узла которого приведена на рис. 1.

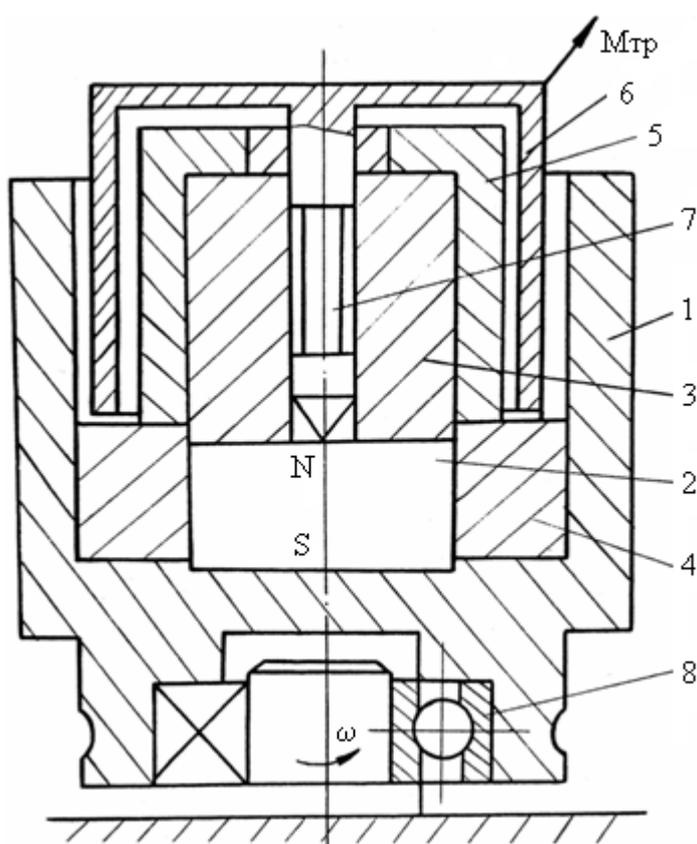


Рис. 1. Измерительный узел ротационного вискозиметра

Вставлен тонкостенный немагнитный цилиндр 6, который для центрирования насажен на ось 7. Образовавшиеся кольцевые зазоры заполняются магнитной жидкостью. Относительная величина зазора – 0,014. Этого достаточно для получения однородного поля напряжений в жидкости. Высота слоя масла 25 мм. Корпус 1 базируется на наружном кольце подшипника 8. Внутреннее кольцо подшипника неподвижно закреплено на станине. Приведенная конструкция отличается простотой достижения концентрического расположения цилиндрических измерительных поверхностей.

Для уменьшения магнитного поля в зазоре, заполненном жидкостью, в корпус вставляются магнитопроводящие кольца 9 различной толщины. Эффект достигается за счет того, что часть магнитного потока, создавае-

Измерительный узел состоит из фасонного корпуса 1, выполненного из магнитомягкой стали. Внутри корпуса установлен постоянный магнит 2 из сплава $SmCo$, к одной из полярных поверхностей которого примыкает цилиндрический магнитопровод 3 с осевым отверстием. Магнит и цилиндр центрируются немагнитным кольцом 4. На магнитопровод 3 одета немагнитная втулка 5. Магнитная система, образованная магнитом 2, корпусом 1 и цилиндром 3, создает радиальное поле между корпусом и цилиндром. В область между корпусом и втулкой коаксиально и с одинаковыми зазорами

мого постоянным магнитом, проходит через кольцо и не попадает в зазор. Таким образом, поле в зазоре регулируется практически от нуля до 0,22 Тл.

Корпус вискозиметра приводится во вращение от электродвигателя через многоступенчатый редуктор. Измерительный стакан удерживается от вращения с помощью упругого элемента, по деформации которого судят о моменте трения, возникающем в магнитной жидкости, исключив предварительно момент трения оси.

Прибор эксплуатируется следующим образом. Вначале вынимаются цилиндр 6 и втулка 5, и в образовавшийся достаточно большой зазор помещается магнитная жидкость. Затем снятые элементы устанавливаются обратно и устраняются излишки масла. Наличие съемной втулки позволяет упростить заправку вискозиметра и исключить образование пустот. После включения электродвигателя и установления стационарного режима течения жидкости фиксируется момент трения, действующий на поверхность цилиндра 6. При дискретном изменении скорости вращения снимается зависимость момента трения от частоты и рассчитывается зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига.

Прибор для исследования коллоидной стабильности масел. С целью изучения коллоидной устойчивости масел в магнитных полях, а также для исследования факторов, влияющих на структурную стабильность магнитных масел, был разработан и изготовлен данный прибор.

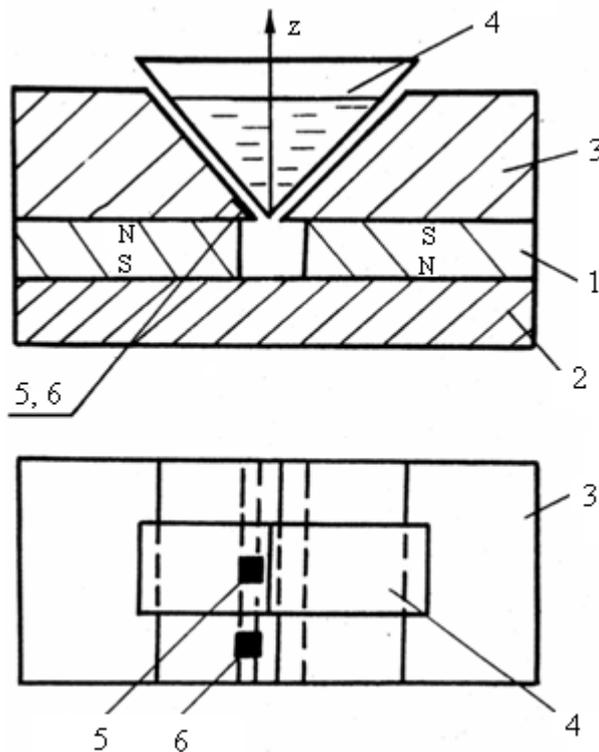


Рис. 2. Принципиальная схема прибора для исследования структурной стабильности магнитных масел

Принципиальная схема прибора показана на рис. 2. Прибор состоит из источников магнитного поля – двух прямоугольных постоянных магнитов 1 марки КС-37, плоского, замыкающего поле магнитопровода 2, двух магнитопроводов 3, создающих неоднородное поле в клиновидном зазоре (угол клиновидности 120°). В зазор помещается кювета 4 с исследуемым магнитным маслом. Индукция магнитного поля в ММ измеряется с помощью преобразователя Холла 6. Разность сигналов с преобразователей 5 и 6 пропорциональна намагниченности ММ. Коэффициент пропорциональности устанавливается опытным путем. Нижняя часть кюветы устанавливается в области, где максимальная величина поля и максимальная его не-

однородность. В этой же части кюветы измеряется намагниченность ММ. Из-за конечности размеров преобразователей Холла измерялась средняя намагниченность на высоте слоя жидкости, равного 0,15 мм.

Устойчивость ММ определяется следующим образом. В кювету помещается фиксированный объем ММ и замеряется исходная намагниченность. Под действием неоднородного магнитного поля (характер изменения поля в зазоре показан на рис. 3) происходит перераспределение дисперсных частиц в объеме ММ. Наибольшая концентрация частиц образуется в нижней части кюветы. Измеряя намагниченность ММ в этой точке, можно проследить динамику перераспределения частиц.

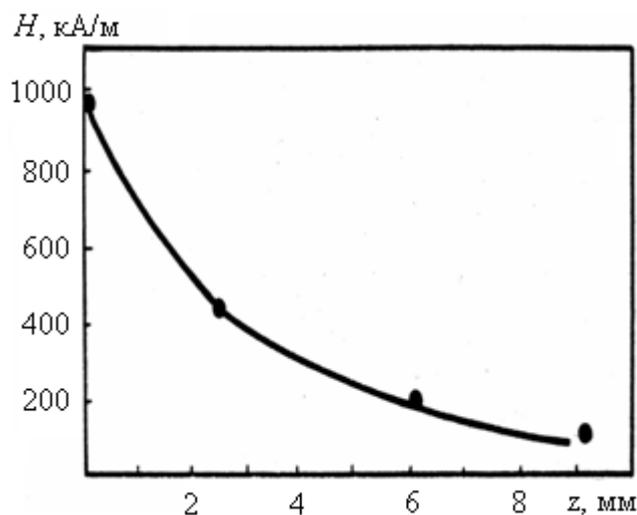


Рис. 3. Характер изменения магнитного поля в зазоре

Скорость нарастания намагниченности характеризует степень седиментационной неустойчивости ММ. Поскольку неоднородность поля уменьшается по высоте клиновидного зазора, то, поднимая кювету, можно проверить устойчивость ММ в менее однородных полях. Для контроля намагниченности кювету в этом случае следует кратковременно опускать в исходное положение.

Прибор для оценки коррозионных свойств магнитных масел. Для оценки коррозионных свойств смазочных масел разработана методика, учитывающая физико-механические процессы, происходящие на реальных поверхностях трения. Для реализации данной методики спроектирован специальный прибор. Метод определения коррозионных свойств масел, положенный в основу работы прибора, заключается в определении изменения электрического сопротивления металлических образцов в результате протекания коррозионных процессов на их поверхности. Предполагается, что образующиеся при коррозии на поверхности образцов вещества, имеют значительно более низкую электропроводность, чем основной материал. Исключения из этого предположения весьма редкие.

В отличие от известных методов, включая способ «горячей проволоки» [4], разработанный метод более полно моделирует коррозионные процессы, протекающие при трении на пятнах фактического контакта. Это достигается тем, что проволочка подвергается действию периодических растягивающих напряжений, сопровождающихся одновременным повышением ее температуры. Известно, что именно растягивающие напряжения в поверхностях трения наиболее сильно влияют на коррозионно-механический износ [5]. Напряжение в проволочке создается силой Ампе-

ра, возникающей при протекании по ней тока в присутствии магнитного поля. Этот же ток и создает температурные вспышки.

Прибор состоит из прямоугольной кюветы 1 (рис. 4), выполненной из фторопластового материала, внутри которой закреплены на токопроводящих шинах 10 испытываемые проволочки (образцы) 2. Кювета заполняется жидкостью (маслом) 3 таким образом, чтобы проволочки находились внутри нее. Одна из сторон кюветы 4 выполнена съемной для удобства крепления проволочек. Для сохранения герметичности кюветы предусмотрена эластичная прокладка 5.

Кювета помещается в магнитную систему, создающую магнитное поле с однородностью не хуже 5%, причем вектор индукции направлен перпендикулярно к оси проволоки.

Магнитная система состоит из постоянного магнита 6, к полюсным поверхностям которого примыкают плоские магнитопроводы 7. Индукция магнитного поля регулируется посредством изменения расстояния пластины 8 из магнитомягкого материала от постоянного магнита. В зависимости от расстояния пластины 8 до магнита изменяется соотношение между полезным магнитным потоком и толщиной немагнитной прокладки 9. При необходимости прибор может быть помещен в термошкаф.

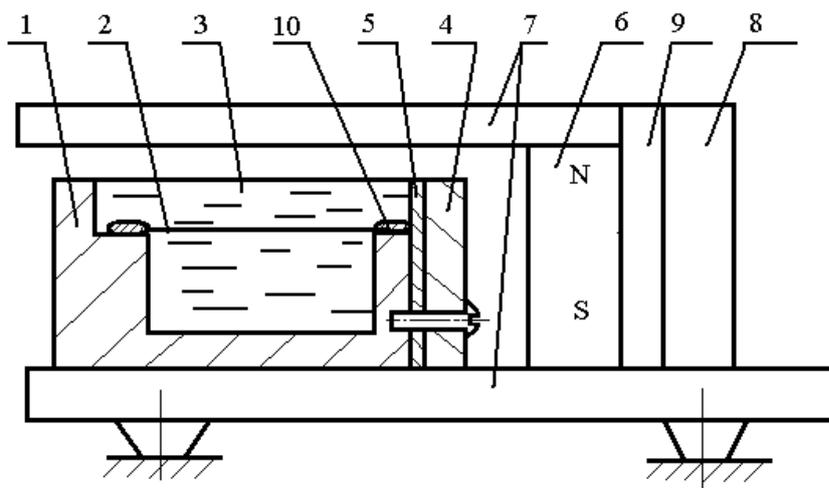


Рис. 4. Кювета прибора для исследования коррозионных свойств масел

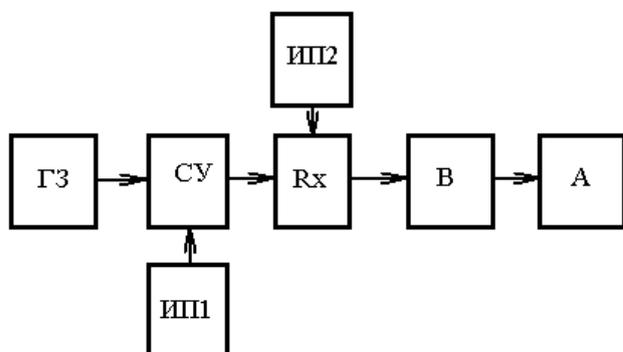


Рис. 5. Принципиальная схема прибора для исследования коррозионных свойств масел

Электрическая схема прибора (рис. 5) включает генератор (ГЗ) переменного напряжения, задающий частоту и форму импульсов тока, протекающих через испытываемую проволочку (Rx). Амплитуда тока задается с помощью системы управления (СУ), питаемой от источника напряжения (ИП1). Для

измерения сопротивления проволоочки к ней подключают источник напряжения (ИП2), электронный вольтметр (В) и амперметр (А).

Тонкая металлическая нить закрепляется к токонесущим пластинам, которые располагаются на расстоянии L , таким образом, чтобы в центре имелся прогиб величиной h . Для значений растягивающих напряжений в нити от 10^5 до 10^8 Па отношение h/L следует выбрать порядка 10^{-2} , а диаметр нити d должен быть $\ll L$.

Наиболее надежные результаты, которые хорошо коррелируют с данными натуральных испытаний, получаются тогда, когда пропускается переменный электрический ток с прямоугольной формой знакопеременных импульсов длительностью $t \sim 1-10^{-1}$ с. Токовые импульсы чередуются через время t для охлаждения нити.

Под действием электрического тока в нити создаются напряжения величиной

$$\sigma \approx \frac{2 \cdot J \cdot B \cdot L}{\pi \cdot d^2 \cdot h},$$

где σ – напряжения; J – сила тока; B – индукция магнитного поля; L – длина металлической нити; h – величина прогиба нити; d – диаметр нити.

Если предположить, что нагревание нити электрическим током происходит в условиях адиабатического процесса, принимая во внимание небольшую длительность процесса, то максимальное повышение температуры можно оценить по формуле

$$\Delta T_{\max} \approx \frac{16 \cdot J^2 \rho_r \cdot t}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot \rho_m \cdot C_y},$$

где t – время; ρ_r – удельное электросопротивление металлической нити; ρ_m – плотность материала нити; C_y – удельная теплоемкость.

В действительности прирост температуры будет несколько незначительно иным из-за теплопроводности и зависимости ρ_r от температуры.

Методика проведения исследований заключалась в следующем. Сначала к токопроводам в кювете подпаивали концы нити, чтобы на ней имелся прогиб величиной 1–2 мм. Кювету заливали маслом, устанавливали в магнитной системе, и затем помещали в термошкаф. После чего замеряли начальное сопротивление нити и включали переменный ток. Через заданные промежутки времени измерялось текущее значение сопротивления нити. Скорость коррозии оценивалась по относительному изменению сопротивления металлической нити.

Частота следования токовых импульсов через проволоочку определяется временем взаимодействия шероховатостей поверхностей трения, а температура проволоочки, равная температуре «вспышки», устанавливается подбором силы тока. Изменяя индукцию магнитного поля, задают напряжения в проволоочке такие же, как на поверхностях трения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 12-08-00159-а).

Библиографический список

1. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин [и др.]: под общей редакцией Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.
2. Болотов, А.Н. Магнитное масло для узлов трения, работающих при граничной смазке / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2011. № 9. С. 27-32.
3. Bolotov, A.N. Magneto-liquid sliding bearings / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, V.G. Pavlov // Friction and wear. 2004. V. 25. № 3. С. 286-291.
4. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение / Д. Кламанн. Международные стандарты.: Пер. с англ. / Под. ред. Ю.С. Заславского. М.: Химия, 1988. 488 с.
5. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.

УДК 621.785:669.14.018.29

И.А. Барабонова, Н.С. Зубков, М.В. Новоселова, Л.Е. Афанасьева
Тверской государственный технический университет

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Описаны результаты экспериментальных исследований триботехнических свойств (коэффициента трения, твердости, интенсивности изнашивания) быстрорежущей стали после лазерной поверхностной обработки.

Ключевые слова: коэффициент трения, твердость, интенсивность изнашивания, быстрорежущая сталь, лазерная обработка.

TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF A HIGH-SPEED STEEL AFTER LASER SURFACE PROCESSING

The tribotechnical properties of high-speed steel after laser processing of a surface have been investigated. The values of the friction coefficient, the hardness and the wear intensity were estimated experimentally. Some experimental results are presented in the paper.

Key words: friction coefficient, hardness, wear intensity, high-speed steel, laser processing.

Лазерное излучение широко применяется в различных технологических процессах, одним из которых является поверхностное упрочнение изделий с целью повышения их эксплуатационных свойств. Поверхностное упрочнение лазерным лучом характеризуется рядом особенностей, например, упрочнением локальных (по глубине и площади) объемов материала обрабатываемых деталей и инструмента в местах их изнашивания; локальным упрочнением поверхностей изделий сложной формы [1, 2].

Наибольшее практическое использование получила лазерная закалка без оплавления поверхности, так как при низких скоростях движения лазерного луча в зоне оплавления образуется микроструктура с пониженным

значением микротвердости. Влияние зоны оплавления на механические свойства оценивается в литературе весьма противоречиво. Экспериментальных данных до настоящего времени получено недостаточно.

Данная работа посвящена исследованию триботехнических характеристик (коэффициента трения, твердости, интенсивности изнашивания) образцов быстрорежущей стали марки Р6М5 после лазерной закалки с оплавлением поверхности.

Лазерную закалку образцов выполняли на базе специализированного предприятия ООО «Лазтеруп» г. Владимир на автоматизированном лазерном комплексе АЛТКУ – 3 с многоканальным CO₂ лазером. Мощность выходного излучения лазера 3 кВт [3]. Образцы стали марки Р6М5 после объемной закалки и трехкратного отпуска обрабатывались непрерывным лазерным излучением мощностью $P = 2,0 \dots 2,4$ кВт со скоростью $v = 15 \dots 25$ мм/с и размером пятна лазерного излучения 6 мм. Макрошлиф поперечного сечения одного из образцов в зоне лазерного воздействия представлен на рис. 1.

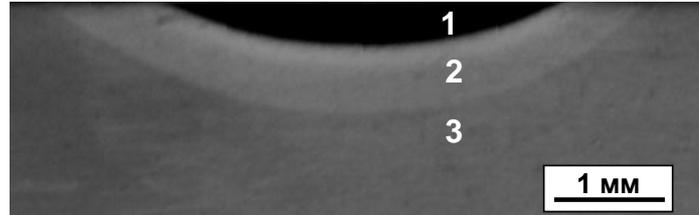


Рис. 1. Макрошлиф поперечного сечения образца стали марки Р6М5 в зоне лазерного воздействия:
1 – зона закалки из жидкой фазы,
2 – зона закалки из твердой фазы,
3 – основной металл [4]

Для определения коэффициента трения стальных образцов в области лазерной обработки использовали микротрибометр [5]. Измерения проводились по схеме шар-плоскость, плоский образец изготовлен из исследуемого материала, сферический контрообразец – из стали ШХ15. Результаты измерений коэффициента трения f в различных направлениях относительно движения лазерного луча по поверхности образца (упрочненной дорожки) представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Для определения коэффициента трения стальных образцов в области лазерной обработки использовали микротрибометр [5]. Измерения проводились по схеме шар-плоскость, плоский образец изготовлен из исследуемого материала, сферический контрообразец – из стали ШХ15. Результаты измерений коэффициента трения f в различных направлениях относительно движения лазерного луча по поверхности образца (упрочненной дорожки) представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1. Коэффициент трения образцов стали Р6М5 в зоне лазерного воздействия

Номер образца	1	2	3	4
Режимы (P, v)	Без лазерной обработки	2,4 кВт, 25 мм/с	2,0 кВт, 15 мм/с	2,4 кВт, 15 мм/с
Вдоль дорожки	$0,28 \pm 0,03$	$0,24 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,02$	$0,20 \pm 0,03$
Поперёк дорожки	$0,29 \pm 0,02$	$0,22 \pm 0,02$	$0,22 \pm 0,03$	$0,19 \pm 0,02$

В ходе исследований установлено, что направление измерения коэффициента трения вдоль и поперёк дорожки лазерного воздействия не влияет на его величину (см. табл. 1 и рис. 2). Лазерная обработка поверхности на указанных режимах снижает коэффициент трения на 15–20%.

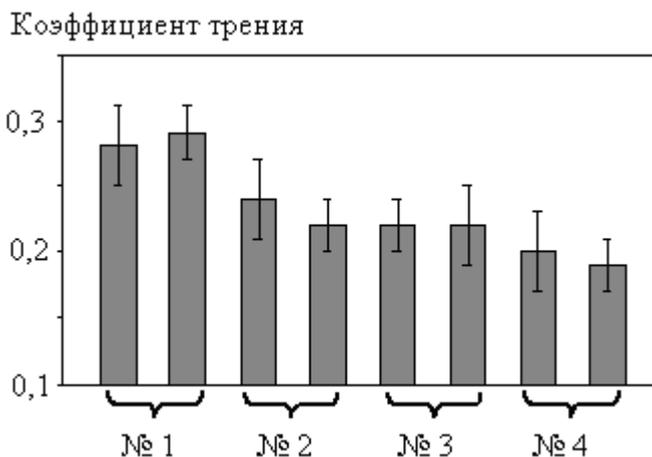


Рис. 2. Коэффициент трения образцов стали марки P6M5 в зоне лазерного воздействия (см. табл. 1)

Твердость образцов определяли вдавливанием в поверхность материала алмазных инденторов в виде пирамиды и конуса. Величину твердости H_{IT} оценивали по нормальному усилию F_{max} на индентор и площади отпечатка A_p [6]:

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p}$$

Экспериментальные значения твердости представлены в табл. 2.

Таблица 2. Твердость (МПа) образцов стали марки P6M5 в зоне лазерного воздействия при различных нагрузках на индентор

Номер образца		1	2	3	4
Режимы		Без лазерной обработки	2,4 кВт, 25 мм/с	2,0 кВт, 15 мм/с	2,4 кВт, 15 мм/с
Усилие	150 г	10320÷12490	6750÷11550	14130÷17700	9280÷12490
	200 г	5370÷7400	4160÷4920	6840÷8030	4330÷7810
	2 кг	5730	8960	7930	8960
	3 кг	5500	6790	7850	8600

Микротвердость измерялась при усиллии 150 и 200 г, глубина отпечатка составляла 2–3 мкм и 4–5 мкм соответственно. Широкий диапазон значений микротвердости свидетельствует о неоднородных свойствах поверхностного слоя материала (см. табл. 2). Средние значения микротвердости при усиллии 150 г значительно превышают значения при 200 г.

Сравнение микротвердости поверхностных слоев при усиллии 200 г показывает, что после лазерного воздействия на поверхность мощностью 2,0 или 2,4 кВт и со скоростью 15 мм/с твердость повышается по сравнению с необработанной поверхностью на 25–35%. После закалки в режиме $P = 2,4$ кВт и $v = 25$ мм/с твердость упрочненной дорожки чуть ниже, чем твердость поверхности необработанной лазером. Возможной причиной пониженной микротвердости в оплавленной зоне является повышение количества остаточного аустенита при повышении скорости движения лазерного луча.

Мезотвердость образцов измеряли при усиллии 2 и 3 кг. Глубина отпечатка в этом случае составляла 15–45 мкм соответственно. Приведенные результаты (см. табл. 2) свидетельствуют, что после лазерной обработки в ука-

занных режимах мезотвердость обоих образцов составляет примерно 8000 МПа, что на 30% выше по сравнению с необработанной поверхностью.

Испытание на изнашивание исследуемых образцов проводили о закрепленный абразив по схеме шар – плоскость. В качестве контробразца использовали сферический наконечник диаметром 1 мм с алмазным напылением (рис. 3).

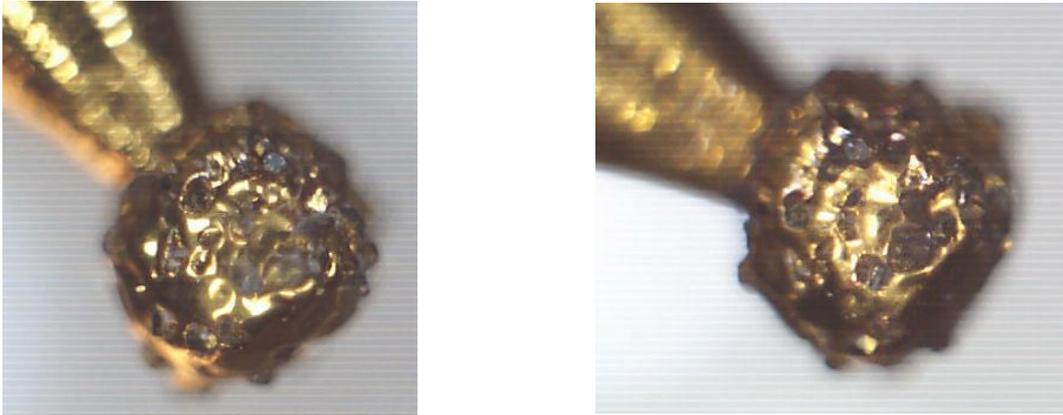


Рис. 3. Вид наконечника с алмазным напылением до (а) и после (б) испытаний

К контакту прикладывали усилие 50 г. Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контробразца осуществлялись электромеханическим приводом с питанием от генератора импульсов с частотой 20 Гц. За один период путь трения составлял 10–12 мм. Каждый образец подвергался испытанию в течение 10 часов. Общий путь трения составлял 7200–8600 м. Далее с поверхности образцов были сняты профилограммы. Профиль дорожки изнашивания представлен на рис. 4.

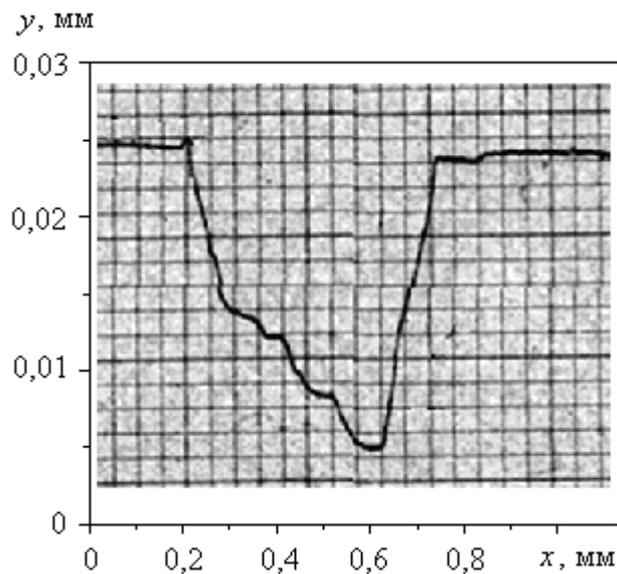


Рис. 4. Профиль дорожки изнашивания

По профилограмме определяли глубину и ширину дорожки изнашивания. Далее рассчитывали линейную и объемную интенсивность изнашивания (табл. 3).

Глубина изношенной канавки соизмерима с глубиной отпечатка при измерении мезотвердости. Лазерное воздействие на материал в указанных режимах повысило твердость в 1,3 раза, но не оказало заметного влияния на его абразивную износостойкость.

Таблица 3. Характеристики изнашивания стальных образцов

Номер образца	1	2	3	4
Режимы	Без лазерной обработки	2,4 кВт, 25 мм/с	2,0 кВт, 15 мм/с	2,4 кВт, 15 мм/с
Глубина износа, мм	0,026	0,026	0,032	0,016
Скорость изнашивания, 10^{-3} мм ³ /ч	1,7	1,6	1,9	1,1
Линейная интенсивность изнашивания, 10^{-9}	3,0	3,0	3,7	1,9
Объемная интенсивность изнашивания, 10^{-15} м ²	2,0	1,9	2,2	1,3

Следует отметить, что твердость не является исчерпывающим критерием износостойкости трущихся поверхностей. Это связано с тем, что процессы деформирования и разрушения поверхностного слоя при изнашивании отличаются от того процесса, который происходит при внедрении в испытуемый материал индентора (абразива). Действие абразивного зерна или продуктов изнашивания можно условно разделить на две стадии: внедрение на определённую глубину и процарапывание, которое в основном определяет изнашивание материала. Первая стадия в количественном отношении характеризуется твердостью материала, в то время как вторая определяется его структурой. То есть абразивная износостойкость является структурно-чувствительной характеристикой.

Для абразивного механизма изнашивания объемная интенсивность I_V может быть выражена формулой Хольма – Арчарда [7]

$$I_V = k \frac{N}{H},$$

где k – коэффициент изнашивания; N – усилие, приложенная к контакту; H – твердость материала образца. Коэффициент изнашивания меняется в широких пределах в зависимости от материала и механизма изнашивания. Обычно принято считать для интенсивного изнашивания $k \approx 10^{-2}$, для умеренного изнашивания $k \approx 10^{-8}$.

Средние значения коэффициента изнашивания исследуемых образцов приведены в табл. 4. Они сравнимы по порядку величины с известными значениями для упрочненных инструментальных сталей [8].

Таблица 4. Коэффициент изнашивания стальных образцов

Номер образца	1	2	3	4
Режимы	Без лазерной обработки	2,4 кВт, 25 мм/с	2,0 кВт, 15 мм/с	2,4 кВт, 15 мм/с
Коэффициент изнашивания, 10^{-5}	2,9	2,9	4,3	2,2

Проведенные эксперименты по абразивному изнашиванию стальных образцов, обработанных лазерным излучением, не выявили значительного повышения износостойкости по сравнению с необработанной лазером поверхности. При лазерной закалке с оплавлением поверхности быстрорежущей стали в оплавленной зоне образуется повышенное количество метастабильного высоколегированного аустенита. Из этого следует, что лазерная закалка с оплавлением поверхности должна применяться в сочетании с последующими термическими обработками – холодом, отпуском, или другими технологическими воздействиями, позволяющими целенаправленно создавать микро- и наноструктуру, необходимую для повышения абразивной износостойкости инструмента.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Библиографический список

1. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюрюв. М.: МГТУ, 2006. 664 с.
2. Астапчик, С.А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С.А. Астапчик, В.С. Голубев, А.Г. Маклаков. Минск: Беларус. Наука, 2008. 251 с.
3. Югов, В.И. Лазерное термоупрочнение – высокоэффективная технология ресурсосбережения / В.И. Югов // Лазер-Информ. 2008. № 23 (398). С. 1–8.
4. Афанасьева, Л.Е. Структурное состояние инструментальной стали после лазерной закалки с оплавлением поверхности / Л.Е. Афанасьева, И.А. Яковлев, П.О. Зоренко, Н.С. Зубков, Р.М. Гречишкин // Металлургия машиностроения. 2010. № 4. С. 17–20.
5. Патент РФ № 2150688. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала / В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, И.Н. Нестерова, А.А. Иванова; опубл. 10.06.2000. Бюл. № 16.
6. International standard EN ISO 14577-1:2002. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.
7. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. М.: Физматлит, 2007. 368 с.
8. Мышкин, Н.К. Электрические контакты / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Брауневич. М.: Долгопрудный, Издательский дом «Интеллект», 2008. 560 с.

УДК 621.313.04

Ф. Веселка
Технический университет г. Брно, Чешская Республика
В.Н.Забоин
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЩЕТОК МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Предложен метод ускоренного измерения величины износа электрических щеток с помощью оптической микроскопии. Разработан и изготовлен кониметр для практической реализации метода. Проведено сопоставление получаемых расчетных результатов с данными длительных ресурсных испытаний щеток различных фирм.

Ключевые слова: электрощетка, износ, пыль, кониметр, микроскоп, гранулометрия

THE INVESTIGATION OF WEAR INTENSITY OF ELECTRIC BRUSHES BY OPTICAL MICROSCOPY

The method of fast measurements for wear intensity of electric brush with optical microscopy has been proposed. The konimeter has been designed and manufactured for practical implementation of the method. The comparison of calculated data with the results of resource tests has been carried out.

Key words: electric brush, wear, dust, konimeter, microscopy, granulometry

Текущая высота электрической щетки h_i является определяющим показателем эффективности, надежности и безопасности систем токосъема электрических машин различного назначения. Для определения случайной величины h_i при ее линеаризация веерной функцией времени t_i необходимо и достаточно знать среднее значение интенсивности (скорости) износа щетки V_{hn} и ее дисперсию $d_{V_{hn}}$ в каждом n -ом из предполагаемых (требуемых) режимов работы системы [1]. Поэтому экспериментальные исследования зависимости V_h от различных факторов воздействия и условий эксплуатации щетки имеет важное практическое значение.

Непосредственное определение V_h является чрезвычайно трудоемкой и рутинной задачей, связанной с необходимостью строгого поддержания неизменными значения факторов воздействия, газового состава, влажности и температуры окружающей среды в течение многих десятков и даже сотен часов, поскольку величина износа электрощеток, как правило, составляет несколько миллиметров за 1000 часов их эксплуатации. Определение лишь одного достоверного значения V_h требует 50–100 часов работы на специальных лабораторных стендах, а для нахождения, например, трехфакторных математических моделей износа, даже при использовании методов теории планирования эксперимента, необходимо получение не менее девяти значений V_h [2].

Для кардинального сокращения времени определения V_h в VUT (Техническом университете г. Брно, Чехия) было предложено измерять не

уменьшение высоты щетки за несколько десятков часов работы, а собирать пылевидные продукты ее износа в течение нескольких минут и проводить их дисперсионный анализ методом оптической микроскопии.

Методы оптической (световой) микроскопии давно и широко используется в различных отраслях науки и производства для определения дисперсионного состава промышленных пылей, порошков и измельченных материалов, а также в медицине и биологии для цитометрии и измерения числа и размеров различных микроорганизмов. Все эти методы предполагают отбор исследуемого материала, изготовление из него микропрепарата и проведение требуемого анализа [3, 4].

При определении дисперсионного состава аэрозолей с твердой дисперсной фазой (пыли, порошки) для отбора части запыленного воздушного потока обычно применяются байпасы (трубки, сопла, насадки), содержащие внутри различного вида импакторы – препятствия в виде предметного стекла с адгезионным слоем или просто фильтра [3, 4].

Для сбора продуктов износа электрических щеток непосредственно в зоне их выделения (см. рис. 1) в *VUT* был разработан и изготовлен [5] алюминиевый байпас с разборным импактором, представленным на рис. 2.

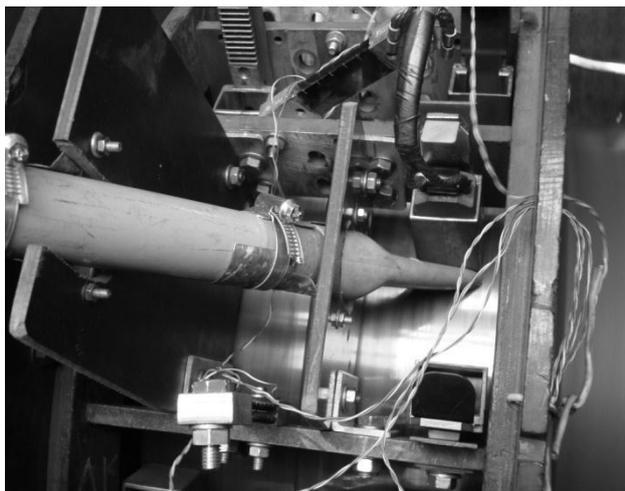


Рис. 1. Пример установки байпаса в зоне выделения продуктов износа щетки на физической модели контактных колец турбогенератора мощностью 500 МВт

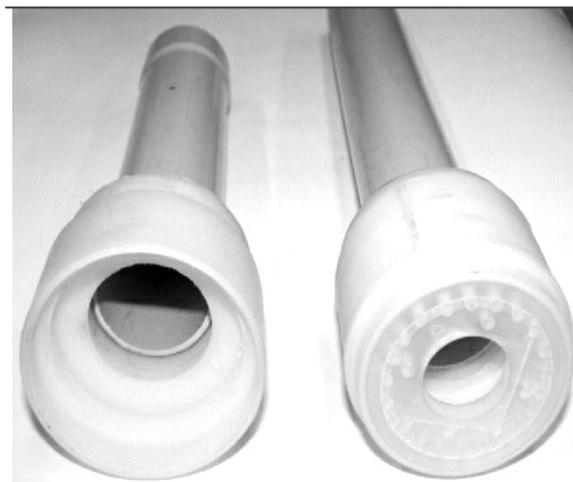


Рис. 2. Разборный импактор - кониметр *VUT* с внутренней выемкой квадратной формы для размещения предметного стекла

В выемку квадратной формы внутри импактора устанавливалось лабораторное предметно стекло с тонким адгезионным слоем жидкого масла на поверхности. Запыление стекла продуктами износа щетки осуществлялось разрежением воздушного потока в байпасе с помощью бытового пылесоса.

Изменение сечения, направления и скорости отдельных струй воздушного потока в рассматриваемой конструкции импактора (кониметра *VUT*) предполагает, конечно, его непременно тарирование, если необходимо получать количественные характеристики износа щеток с требуемой

точностью. Однако, даже при наличии систематической ошибки измерения, кониметр *VUT*, по всей вероятности, может быть использован для быстрой и достоверной оценки статистической значимости влияния отдельных факторов воздействия на интенсивность износ электрощеток.

Экспериментальная проверка возможности применения в исследовательской практике кониметра *VUT* проводилась в СПбГПУ на полномасштабной физической модели узла токосъема турбогенератора 500 МВт (см. рис. 1). Запыленные в течение 10, 15 и 20 минут предметные стекла извлекались из кониметра, накрывались аналогичными по размеру покровными стеклами и отправлялись в *VUT* для фотографирования под микроскопом при 50-кратном и 130-кратном увеличении. Полученные фотографии (см., например, рис. 3) независимо и по-разному анализировались в *VUT* и СПбГПУ, а результаты сравнивались с данными длительных ресурсных испытаний электрографитированных щеток производства «Carbone Lorraine», Франция) и *Schunk* (Германия).

Анализ дисперсного состава (гранулометрический анализ) частиц на оптическом изображении пыли или порошка является чрезвычайно трудоемким процессом, поскольку требует подсчета числа частиц N_i в каждом из 6–10 диапазонов изменения одного из выбранных эквивалентных диаметров – по площади d_F (чаще всего), по Мартину d_M или Фере d_{Fer} [3]. Далее по полученным значениям N_i строятся соответствующие гистограммы и определяются функции распределения $D(d)$ или плотности распределения $\varphi(d)$ частиц по числу, поверхности или объему [3, 4].

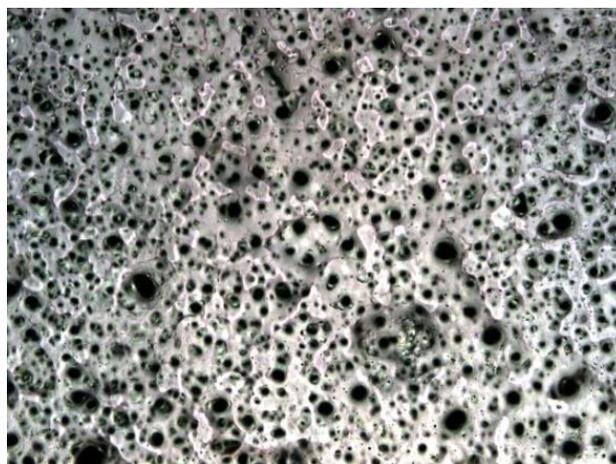


Рис. 3. Фотография пылевидных продуктов износа щетки Е 104 фирмы «Schunk» на предметном стекле при 130-кратном увеличении под микроскопом

В *VUT* на оптическое изображение щеточной пыли накладывалась сетка из 100 квадратных ячеек, в которых определялось число частиц N_i в каждом из 6 ($i = 6$) диапазонов изменения d_{Fi} от 1 до 6 мм на увеличенной фотографии. Частицы с $d_F \leq 1$ мм (при 130-кратном увеличении) и реальным объемом $V_i \leq 2,3 \cdot 10^{-7}$ мм³ не учитывались, так как их суммарный объем $V_{i\Sigma}$ не превышал 2,5% от полного объема собранной пыли V_Σ . Доля частиц с $d_F \geq 6$ мм, $V_i \geq 5,14 \cdot 10^{-5}$ мм³ и $V_{i\Sigma} \approx 5–10\%$ от V_Σ так же не учитывалась, что, конечно, увеличивало систематическую погрешность измерений. Для статистической оценки величины этой погрешности обычно и находят $D(d)$, численно интегрируя с последующей аппроксимацией данные гистограмм – частотных таблиц N_i/N , или выбирают один из известных законов плотности распределения $\varphi(d)$ для их аналитического выражения [3, 4].

Для аналитического описания $\varphi(d)$ и $D(d)$ однокомпонентных полидисперсных материалов наиболее целесообразно, как показано в монографии Коузова П.А. [4], использовать двухпараметрические распределения: логнормальное (ЛНР), Розина – Раммлера – Шперлинга – Боннета (*RRSB*) или Годена – Андреева – Шумана (ГАШ). Если на соответствующих логарифмических сетках $\varphi(d)$ не является линейной, то следует переходить к трехпараметрическим распределениям, в частности, к распределению Свенсона – Авдеева [4, 6]. Это распределение носит универсальный характер, но определение его параметров возможно лишь численными методами. Кроме того, получаемое в результате его применения уточнение d_{cp} , по сравнению с *RRSB*, незначительно при характерном для щеточной пыли $d_{cp} < 50\text{--}70$ мкм [6]. При этих размерах распределение *RRSB*

$$\varphi(d) = a \cdot b \cdot d^{a-1} \cdot e^{-bd^a}$$

имеет четко выраженную левостороннюю модальность, практически совпадающую с осью ординат, что указывает на возможность однопараметрической аппроксимации $\varphi(d)$ либо простым экспоненциальным (показательным) распределением, либо распределением Мартина [4]

$$\varphi(d) = 100 \cdot b \cdot e^{-bd},$$

где b – параметр распределения, легко определяемый в результате очевидной линеаризации (1) путем его логарифмирования.

Важно подчеркнуть, что любая возможная линеаризация распределений ЛНР, *RRSB*, ГАШ или Мартина позволяет получить переопределенную систему линейных уравнений, решение которой при матричной форме ее записи в виде $\mathbf{X} \mathbf{B} = \mathbf{Y}$ сводится к нахождению вектора-столбца параметра $\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$ методом наименьших квадратов, позволяющим минимизировать дисперсии линейных оценок \mathbf{B} и поверхности отклика \mathbf{Y} по сравнению с другими методами [2].

В *VUT* для анализа дисперсионного состава пылевидных продуктов износа щеток использовалась [7] функция распределения числа частиц от d в виде:

$$\mathbf{f}(d, a, b) = a e^{-bd}, \quad (1)$$

полученная в результате ряда преобразований и упрощений известного трехпараметрического распределения Вейбулла – Гнеденко

$$f(x, a, b, c) = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{x-c}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x-c}{a}\right)^b\right]$$

В частности, полагая, что сдвиг $c = 0$, параметр формы $b = 1$ и $1/a = h$, оно приобретает вид, подобный распределению *RRSB* (при $a = 1$) или распределению Мартина

$$f(x, h) = h \cdot e^{-hx}.$$

Вводя в это однопараметрическое выражение новую переменную $d = h x/b$, можно получить (при принятом в [7] обозначении h через a) уравнение (1).

После простых преобразований функция плотности распределения объема (массы) частиц от d с учетом (1) приобретает вид:

$$f(d, a, b) = \frac{\pi}{6} d^3 a e^{-bd},$$

а полный объем продуктов износа может быть вычислен как

$$V_{\infty} = \int_0^{\infty} \frac{\pi}{6} d^3 a e^{-bd} d (d) = \frac{\pi a}{6} \int_0^{\infty} d^3 e^{-bd} d (d) = \pi \frac{a}{b^4}$$

Следовательно, задача расчета объемного износа электрощеток сводится лишь к определению a и b методом наименьших квадратов в результате линеаризации (1). Для их вычисления в [7] предложены формулы:

$$b = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i \cdot \ln N_i) - \bar{d} \cdot \overline{\ln N}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i^2 - \bar{d}^2)},$$

$$\ln a = \overline{\ln N} - \bar{d} \cdot b,$$

которые и использовались в *VUT* для расчета значений линейного износа различных марок электрощеток. В частности, в табл. 1 представлены расчетные и опытные значения износа электрографитированных щеток Е 104 фирмы «Schunk» с размерами $a \times t = 20 \times 32$ мм, работавших при среднем значении тока в них $I_{\text{иср}} = 85$ А ($j_{\text{иср}} = 13,3$ А/см²) и частоте вращения контактных колец 3000 об/мин ($V_{\kappa} = 77,4$ м/с). Скорость линейного износа этих щеток в указанном режиме эксплуатации составляла $8,8$ мм/1000 ч $\pm 17\%$ с $P_d = 95\%$ [8].

Таблица 1. Расчетные и опытные значения линейной скорости износа щеток Е 104

Длительность отбора пыли, мин	Расчетный объем пыли, мм ³	Линейный износ щеток, мкм		Погрешность, %
		Расчет	Опыт	
10	0,870	1,36	1,47	-7,6
15	1,626	2,54	2,20	15,5
20	2,125	3,32	2,93	13,3

Из анализа данных табл. 1 следует, что предлагаемый экспресс-метод расчета скорости износа щеток V_h обладает хорошей инженерной точностью, сопоставимой с точностью ее определения в результате длительных ресурсных испытаний. Меньшие расчетные значения V_h по сравнению с опытом представляются наиболее правильными с учетом неизбежных по-

ть частиц пыли в предлагаемой конструкции кониметра *VUT*, а завышение V_h , по всей вероятности, связано с излишним запылением в нем предметных стекол. Аналогичные результаты были получены и при испытаниях щеток *LFC 554* («*Carbon Lorrain*», Франция) и ЭГ2А («Электроконтакт», Россия).

Программно реализованный в СПбГПУ матричный анализ дисперсного состава продуктов износа щеток в целом подтвердил правильность используемых в *VUT* выражений для определения параметров a и b функции $f(d, a, b)$. Необходимо особо отметить, что применение матричного анализа позволяет значительно сократить время для нахождения параметров при любой линеаризуемой функции распределения числа частиц, поверхностей или массы продуктов износа щеток.

Выводы

1. Разработанный в *VUT* кониметр позволяет кардинально (в 300–500 раз) сократить время при сохранении точности экспериментального исследования интенсивности износа электрощеток и влияния на него различных факторов воздействия не только на специальных лабораторных стендах, но и непосредственно в электрических машинах.

2. Совершенствование предложенного метода оптической микроскопии возможно на основе визуального или автоматического анализа цифрового изображения с использованием одной из многочисленных компьютерных программ (*Scion Image, ImagJ, PhotoM 1.21* и т.п.) или программно-аппаратных комплексов компаний *SIAMS, CMA, «ВидеоТестТ»* и др.

The research was performed in Centre for Research and Utilization of Renewable Energy sources within the project № CZ.1.05/2.1.00/01.0014 supported by the European Regional Development Fund.

Библиографический список

1. Дружинин, Г.В. Статистическая теория износа и разрегулирования аппаратуры / Г.В. Дружинин // Труды ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 1961. Вып. 898.
2. Забоин, В.Н. Математическое моделирование электрических и механических характеристик систем токосъема электроэнергетических машин / В.Н. Забоин // Энергетика. Изв. РАН. 1999. № 3. С. 90-96.
3. Измерения в промышленности: Справочник: В 3 кн. / под ред. П. Профоса. Москва: Металлургия, 1990.
4. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. Л.: Химия, 1987.
5. Veselka F. Měřicí přístroje. VUT, Brno, 2010.
6. Королев Д.В. Анализ дисперсного состава микроскопических объектов с использованием ЭВМ / Д.В. Королев, К.А. Суворов // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-19: Сб. тр. междунар. конф. Воронеж, 2006.
7. Horna, M. Komparativni metoda pro zjištovani rychlosti opotrebeni komutacnich kartacu / M. Horna // Disertacni prace. VUT, Brno 1987.
8. Забоин, В.Н. Исследование ЩКА при повышенных токовых нагрузках для мощных турбогенераторов / В.Н. Забоин // Отчет о НИР. СПб: СПбГПУ, 2011.

УДК 621.313.13

А.П. Архаров, К.С. Любимов
Тверской государственный технический университет**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПАЗА
ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ОТВЕРСТИЯ**

Описано устройство для измерения отклонений взаимного расположения паза и оси отверстия. В предлагаемом устройстве по сравнению с известными расширены технологические возможности за счет одновременного измерения нескольких параметров расположения. Устройство может быть использовано на машиностроительных предприятиях для измерений отклонений взаимного расположения осей несопряженных между собой паза и отверстия в деталях типа вилок и корпусов.

Ключевые слова: измерение, паз, отверстие, деталь.

**MEASUREMENT OF THE SLOT LOCATION
PARAMETRES WITH REGARD THE HOLE AXIS**

The paper concerns the description of the device for the measurement of the misalignment of the relative position of a slot and a hole axis. As compared with common devices the proposed one extends manufacturing capability for account of simultaneous measurement of several location parameters. The above device may be used in machine works for the measurement of a misalignment of relative position of a slot and a hole axis in such parts as forks and cases.

Key words: measurement, slot, hole, relative position.

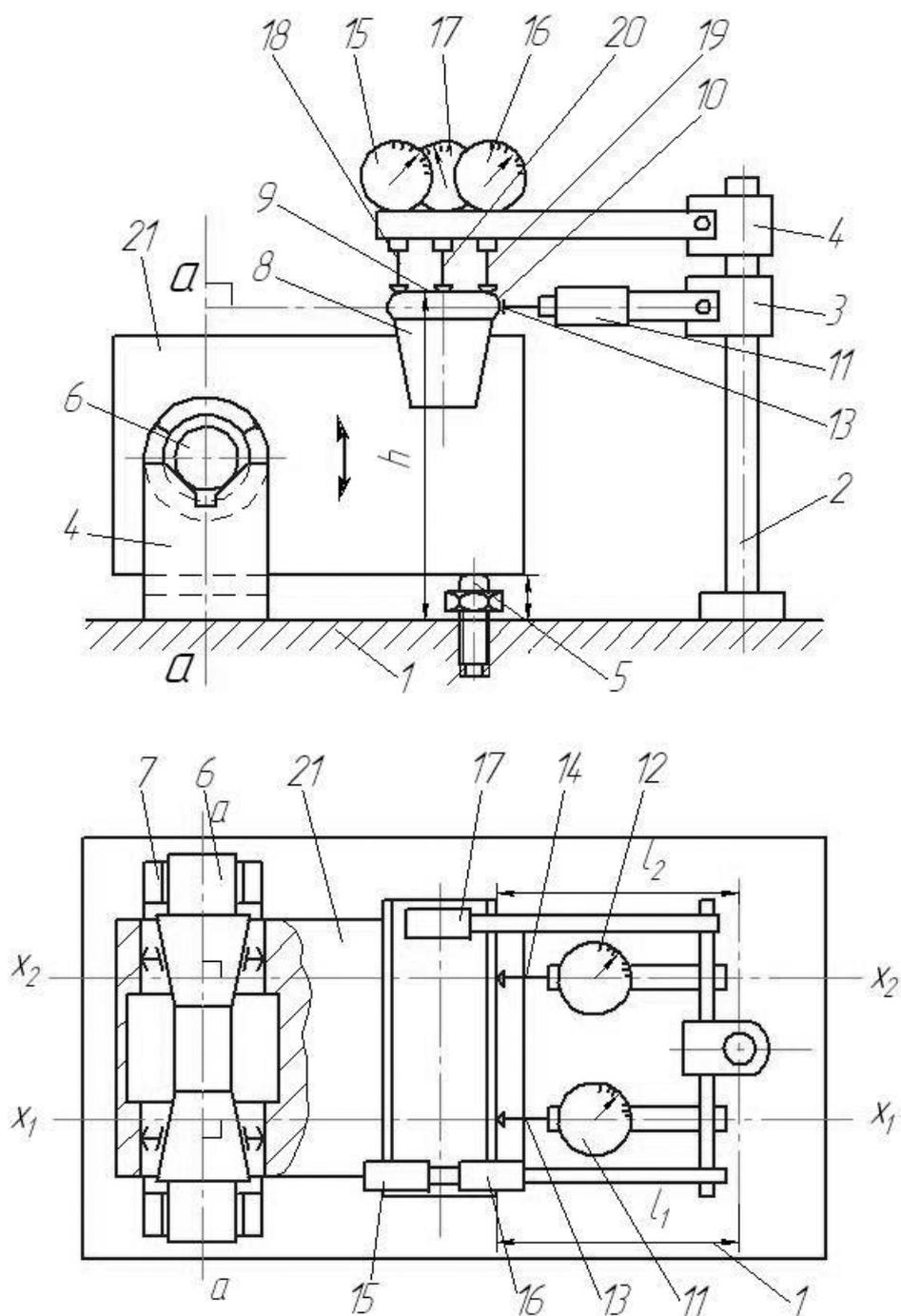
В конструкциях некоторых деталей машиностроения имеются элементы в виде несопряженных между собой отверстия и паза. К их взаимному расположению предъявляются высокие точностные требования, измерения которых вызывает затруднения и имеет низкую производительность.

Для измерения параметров шпоночного паза отверстия известно устройство, позволяющее определить ширину и отклонения от симметричности [1]. Это устройство применимо только для пазов, сопряженных с отверстием. Известно также устройство для измерения отклонений расстояния между перекрещивающимися осями наружной и внутренней цилиндрических поверхностей [2].

Однако указанное устройство имеет ограниченные технологические возможности, поскольку позволяет измерять только отклонение расстояния между перекрещивающимися осями цилиндрических поверхностей и не позволяет измерять отклонение от параллельности осей несопряженных между собой паза и отверстия.

Отмеченных недостатков лишено устройство для измерения отклонений взаимного расположения паза и оси отверстия [3].

На рисунке представлен общий вид разработанного устройства.



Общий вид устройства

Устройство содержит основание 1, на котором размещена стойка 2 с установленными на ней кронштейнами 3 и 4, регулируемый по высоте упор 5, размещенный на основании 1, центрирующий узел, выполненный в виде оправки 6 с парой подвижных конических втулок и призмы 7, установленной на основании 1, базирующую пластину 8 с верхней 9 и боковой 10 измерительными поверхностями, измерительный узел, выполненный в виде двух основных индикаторов 11 и 12, закрепленных на кронштейне 3 и размещенных с возможностью взаимодействия своими измерительными

стержнями 13 и 14 с крайними в продольном направлении точками боковой измерительной поверхности 10, и трех дополнительных индикаторов 15, 16 и 17, закрепленных на кронштейне 4 и установленных с одинаковыми по отношению к основанию 1 вылетами h своих щупов 18, 19 и 20, из которых щупы 18 и 19 расположены с возможностью взаимодействия с крайними в поперечном направлении точками верхней поверхности 9 на одном конце базирующей пластины 8, а щуп 20 – с крайней точкой упомянутой поверхности 9 на другом конце пластины.

Измерительные стержни 13 и 14 установлены на одинаковом вылете относительно оси стойки 2, т.е. $l_1 = l_2$, а их оси $x_1 - x_1$ и $x_2 - x_2$ расположены перпендикулярно биссекторной плоскости $a - a$ призмы 7. Оправка 6 размещена в объекте измерения 21.

Настройка устройства производится по образцовой детали. При настройке в отверстие образцовой детали устанавливают оправку 6 с парой подвижных конических втулок, а в паз – базирующую пластину 8. Затем оправку 6 вместе с образцовой деталью размещают на призму 7. Поворачивают образцовую деталь на упомянутой призме путем подъема или опускания по высоте регулируемого упора 5, добиваясь одинаковых показаний дополнительных индикаторов 15 и 16. В этом положении производится установка основных 11 и 12 и дополнительных 15, 16 и 17 индикаторов на ноль.

При измерении выверяют объект измерения 21 относительно измерительного устройства так же, как при настройке по образцовой детали, добиваясь одинаковых показаний дополнительных индикаторов 15 и 16. В этом положении определяют отклонения от настройки основных индикаторов 11 и 12, что будет соответствовать отклонениям искомого межосевого расстояния, а их разность – отклонению от параллельности осей паза и отверстия в горизонтальной плоскости. По разнице показаний дополнительных индикаторов 16 и 17 определяют отклонение от параллельности осей в вертикальной плоскости.

Таким образом, в предлагаемом устройстве по сравнению с известными за счет базирующей пластины и дополнительных индикаторов, установленных с одинаковыми вылетами своих щупов и размещенных с возможностью взаимодействия с верхней измерительной поверхностью упомянутой пластины, а также иного размещения основных индикаторов, обеспечивается возможность измерения не только отклонения расстояния, но и отклонений от параллельности осей паза и отверстия в двух плоскостях, что расширяет его технологические возможности.

Устройство может быть использовано на машиностроительных предприятиях при измерении отклонений взаимного расположения осей несопряженных между собой паза и отверстия в деталях типа вилок и корпусов.

Библиографический список

1. Патент RU № 2253086. Устройство для измерения параметров шпоночного паза отверстия / А.П. Архаров; заявл. 03.02.2004; опубл. 27.05.2005. Бюл. № 15.
2. Патент RU № 2130586. Устройство для измерения отклонений расстояния между перекрещивающимися осями наружной и внутренней цилиндрических поверхностей / А.П. Архаров; заявл. 20.06.1997; опубл. 20.05.1999. Бюл. № 14.
3. Патент RU № 2406969. Устройство для измерения отклонения взаимного расположения паза и оси отверстия / А.П. Архаров; заявл. 19.10.2009; опубл. 20.12.2010.

УДК 622.331.002.5

И.В. Горлов, А.Н. Болотов, Д.И. Горлов
Тверской государственный технический университет

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ МАШИН

Предлагается инновационный подход к эксплуатации машин торфяного комплекса с использованием информационных технологий на основе комплексной диагностики состояния объекта. Предложен оригинальный алгоритм расчёта параметров восстановления работоспособности, обеспечивающий наивысшую эффективность использования машин в сезон добычи и переработки торфа.

Ключевые слова: восстановление, ремонт, диагностика, алгоритм, информационные технологии.

INFORMATION SYSTEM OF MANAGEMENT PERFORMANCE OF MACHINES

The innovative approach to the operation of peat complex machines with the use of information technologies on the basis of object condition complex diagnostic has been proposed. The original algorithm for the calculation of parameters of working capacity restoration has been proposed. It provides the highest efficiency of machine using in the season of peat extraction and peat processing.

Key words: restoration, repair, diagnostics, algorithm, information technology.

В процессе эксплуатации машины для добычи и переработки торфа (МДПТ) подвергаются различным воздействиям, которые приводят к изменению параметров отдельных элементов и машины в целом. В результате всех воздействий машина с течением времени теряет работоспособность.

Для наиболее полной реализации ресурса, заложенного в конструкцию МДПТ, необходимо соблюдать технические условия по эксплуатации, своевременно диагностировать изменение выходных параметров машин в процессе работы и проводить работы по восстановлению работоспособности. При этом точное определение остаточного ресурса при проведении плановых мероприятий по обслуживанию и ремонту позволит исключить отказы машины на торфяных месторождениях в сезон добычи.

Система управления работоспособностью МДПТ реализуется с помощью алгоритма (рис. 1), который предусматривает создание базы данных, меняющихся в процессе наработки для соответствующей машины по каждой диагностируемой системе.

В представленном алгоритме можно выбрать способ расчётов исходя из наличия информации в базе данных. При недостатке информации и отсутствии специальных диагностических средств выбирается *Статистический* способ, который основан на использовании традиционных методов определения периодичности и количества ТО и ремонтов.

В случае расчётов с использованием *Диагностирования* по отдельным сборочным единицам и узлам определяется значение контролируемого параметра N_{ij} , остаточный ресурс $t_{ост}$ и вырабатываются рекомендации по времени и объёму выполнения операций ТО и ремонта, а также устанавливается потребность обменного фонда для обеспечения агрегатного метода ремонта.

Если остаточный ресурс по какой либо системе с контролируемым параметром N_{ij} , меньше периодичности ТО-1, то в большинстве случаев для МДПТ выгоднее провести ремонт до наступления предельного состояния во время текущего ТО, так как в этом случае не потребуются дополнительно останавливать машину на ремонт.

Для анализа потерь рассчитывается экономическая эффективность эксплуатации машины в случае ремонта во время текущего ТО \mathcal{E}_m и сравнивается с экономической эффективностью \mathcal{E}_k при проведении ремонта отдельно от ТО. По результатам сравнения принимается тот или иной вариант проведения работ.

Выбор конкретного варианта обслуживания зависит от большого количества факторов (стоимости, трудоёмкости, статистики используемых решений, условий проведения работ, наличия материалов и комплектующих и др.), поэтому блок выбора (A9, PR-2), показанный в алгоритме на рис. 1, представляет собой справочный массив информации о ранее проведённых ремонтах со статистическими данными о параметрах работ, надёжности и др.

После выбора варианта проведения работ по системе контролируемой N_{ij} параметром, проводится цикл расчётов по системе с N_{ij+1} контролируемым параметром. Расчёты продолжаются до того момента, пока не будут проверены все N_{ij} параметры ($j = j_{max}$).

По результатам расчётов определяется необходимое количество и содержание ТО и ремонтов в наиболее оптимальном сочетании в течение сезона добычи торфа с рекомендациями по проведению капитального ремонта после окончания сезонных работ.

Задача информатизации данного направления включает в себя несколько этапов реализации.

На первом этапе необходимо создать программный продукт, обеспе-

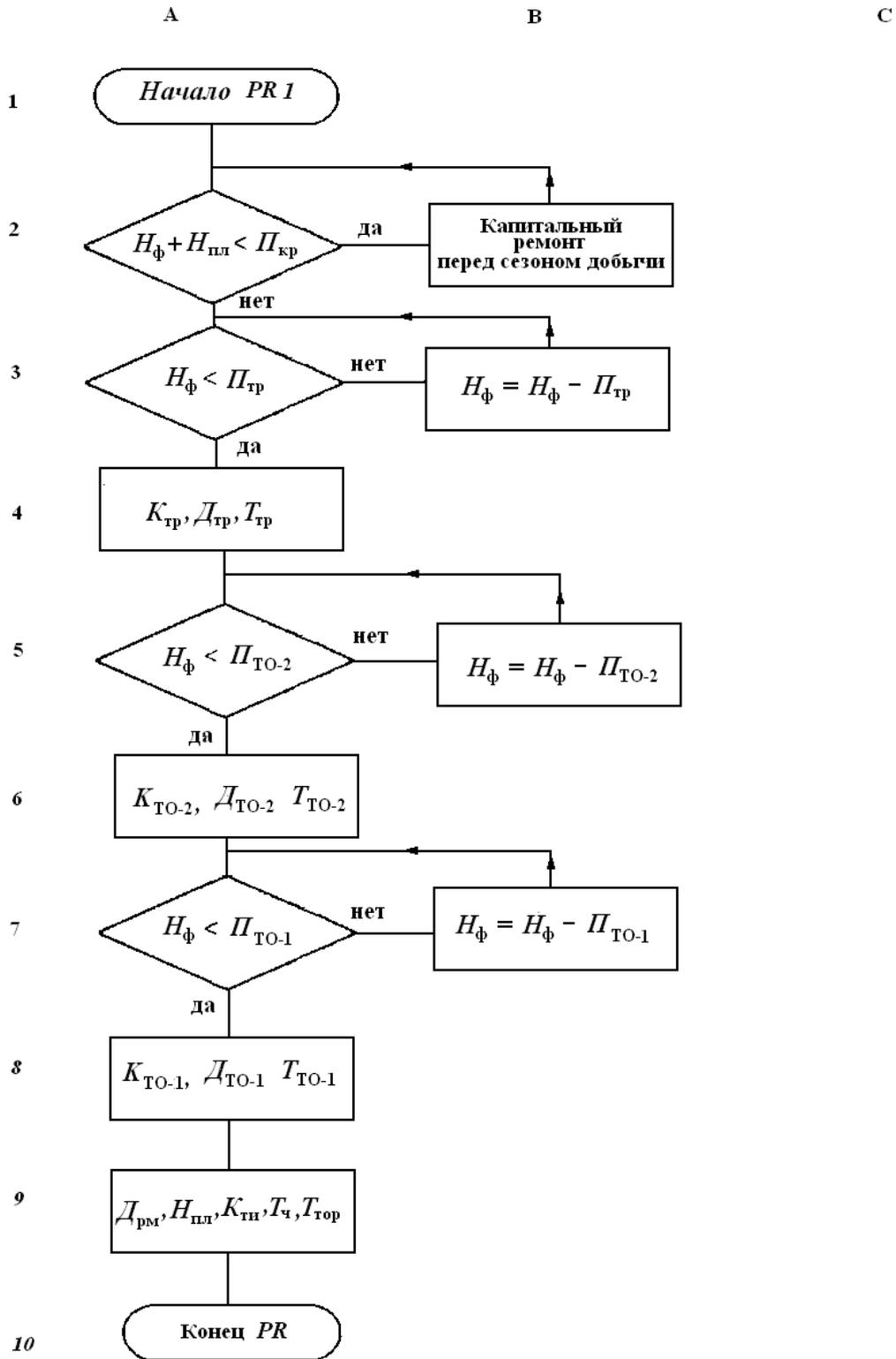


Рис. 1. Продолжение

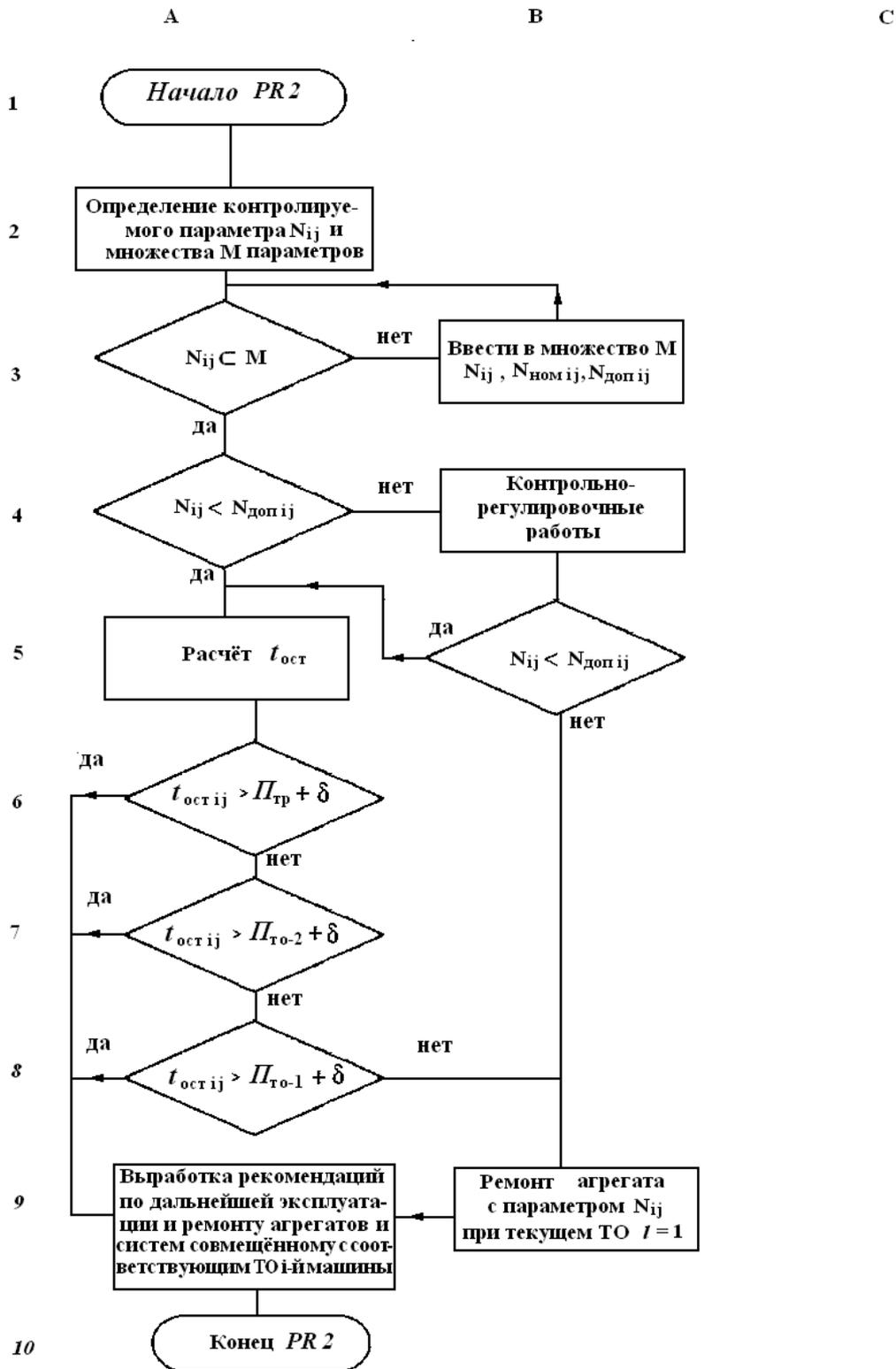


Рис. 1. Продолжение

$P_{кр}$, $P_{тр}$, $P_{то-2}$, $P_{то-1}$ – периодичность проведения ремонтов и обслуживаний;
 $D_{рм}$ – суммарное количество дней простоев в обслуживании и ремонтах в планируемом сезоне;
 $T_{гор}$ – суммарная трудоемкость ремонтов и обслуживаний в планируемом году;
 $D_{гор}$ – суммарное количество дней ремонтов, обслуживаний и диагностики в планируемом сезоне;
 N_{ij} – текущее значение j -го контролируемого параметра i -машины;
 $t_{ост}$ – остаточный ресурс, соответствующий N_{ij} ;
 $N_{допij}$ – допустимое значение j -го контролируемого параметра;
 $H_{ф+1i}$ – показания счетчика моточасов с начала эксплуатации на конец планируемого сезона (на начало следующего сезона);
 $T_{д}$, $T_{то}$, $T_{р}$ – трудоемкость диагностики, обслуживания и ремонтов соответственно;
 $D_{торд}$ – число дней простоев при выполнении предыдущих операций.

Программный продукт должен включать в себя несколько элементов:

- информативный интерфейс с возможностью настройки оператором;
- базу данных с системой управления, в которой должны храниться массивы рабочей информации с возможностью редактирования, как по наполнению, так и по структуре;
- блок переработки информации, построенный на основе специальных алгоритмов, состав и свойства которых можно модифицировать.

На втором этапе происходит наполнение информационной базы, её оптимизация. Элементами второго этапа являются:

- массивы информации о состоянии парка по группам машин;
- справочные данные о возможных путях восстановления работоспособности МДПТ;
- информация о планах реализации ТО и ремонтов, и средствах для реализации этих планов.

На третьем этапе разрабатывается экспертная модель, которая поможет специалисту по эксплуатации МДПТ принимать наиболее оптимальные решения в процессе эксплуатации машин с максимальной экономической эффективностью.

Таким образом, реализация инновационной системы восстановления работоспособности МДПТ позволит эксплуатировать торфяные машины в сезон добычи и переработки с максимальной эффективностью даже в условиях нехватки опытных кадров. Это наиболее актуально в нашем регионе, где в настоящее время нехватка высококвалифицированных специалистов существенно снижает эффективность торфяной индустрии.

Библиографический список

1. Максименко, А.Н. Диагностика строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин: учеб. пособие / А.Н. Максименко, Г.Л. Антипенко, Г.С. Лягушев. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 302 с.
2. Канарчук, Ф.Д. Восстановление автомобильных деталей. Технология и оборудование / Ф.Д. Канарчук, А.Д. Чигринец, О.Л. Голяк, П.М. Шоккий. М.: Транспорт, 1995. 303 с.

УДК 621.928.26

А.В. Кондратьев, С.М. Кочкян, С.П. Смородов, В.А. Русинкевич
Тверской государственной технической университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРОХОЧЕНИЯ ГРАВИЯ НА ВАЛКОВЫХ СОРТИРОВКАХ

Приведены результаты исследований процесса грохочения гравия на валковой сортировке. Обоснована установка подвижных фартуков над рабочей поверхностью сортировки. Представлены зависимости влияния различных факторов на результативность процесса грохочения. Итогом работы явилось совершенствование процесса грохочения за счет его интенсификации.

Ключевые слова: валковая сортировка, подвижные фартуки, эффективность, время грохочения.

IMPROVING THE EFFICIENCY SCREENING GRAVEL ROLLER SORTING

In this paper the results of research process of gravel sifting on roller sort has been presented. Installation of mobile aprons above the work surface of sort has been substantiated. Graphics of various factors depending on the efficiency of the sifting process has been presented. The result of work is the improvement of sifting process due to its intensification.

Key words: roller sort, mobile aprons, efficiency, sifting time.

Для грохочения гравия и щебня, добываемого в карьерах, в основном применяются вибрационные сортировки (грохоты). Однако известно, что валковые грохоты по сравнению с вибрационными более производительны. Кроме того, они имеют дополнительные преимущества: отсутствие вибрации, активная самоочищающаяся просеивающая поверхность [1]. Поэтому применение валковых сортировок для классификации каменных материалов можно считать весьма перспективным. Совершенствование же процесса разделения каменной массы на них позволит не только оптимизировать конструкцию и параметры устройств, но и способствовать внедрению валковых грохотов на промышленных предприятиях по производству нерудных строительных материалов. В связи с этим были проведены экспериментальные исследования процесса грохочения гравия на лабораторных стендах.

Сначала провели сравнительное грохочение (эффективность и время разделения) на вибрационной и валковой сортировках при изменении угла наклона просеивающей поверхности.

Параметры стенда валкового грохота были следующие: форма дисков – восьмигранная, диаметр дисков – 340 мм, толщина дисков – 8 мм, количество валов – 5, расстояние между осями соседних валов – 240 мм, количество дисков на каждом валу – 5, промежуток между соседними дисками одного вала – 20 мм, диаметр вала – 40 мм, угол наклона просеивающей поверхности к горизонту – ($-5^{\circ} \dots +15^{\circ}$), частота вращения валов – 80 об/мин.

Характеристика вибрационного грохота: материал сита – резина, частота вибрации – 20 Гц, размер просеивающей ячейки - 20×20 мм, угол наклона рабочей поверхности к горизонту – (–15°...–5°).

Размер просеивающих поверхностей обоих грохотов: ширина – 140 мм, длина – 1300 мм. Экспериментальные исследования проводили с гравием, средний размер частиц которого варьировал от 5 до 40 мм. Масса навески составляла 20 кг (нижняя фракция – 70%, верхняя – 30%).

Таблица 1. Зависимость эффективности и времени грохочения от угла наклона сортировки

Параметр	Вид сортировки			
	Валковая		Вибрационная	
$\alpha, ^\circ$	$E, \%$	$t, \text{с}$	$E, \%$	$t, \text{с}$
-15	-	-	78	20
-10	-	-	80	35
-5	82	9	83	42
0	90	10	-	-
5	95	11	-	-
10	97	12	-	-
15	98	13	-	-

Численные показатели эффективности E разделения камней и времени t процесса грохочения от изменения угла наклона α просеивающих поверхностей представлены в табл. 1.

Полученные данные показывают, что с увеличением угла наклона просеивающих поверхностей эффективность и время разделения каменных материалов на обеих сортировках повышаются. Однако эффективность грохочения на валковой сортировке в среднем на 10% выше, а время про-

цесса в 2–3 раза меньше, чем на вибрационной. Так, например, повышение E от 82 до 98% на валковом грохоте сопровождалось незначительным увеличением t от 9 до 13 с. А на виброгрохоте при изменении E от 78 до 83% время t повысилось существенно – от 20 до 42 с. Это, в свою очередь, подтверждает очевидное преимущество валкового грохота по сравнению с вибрационным. Из полученных данных видно, что для валкового грохота рациональное значение угла наклона α просеивающей поверхности находится в интервале 5...15°.

Дальнейшие исследования относились к вопросу совершенствования процесса грохочения на валковых сортировках. Для решения данной задачи было предложено над рабочей поверхностью валкового грохота устанавливать подвижные эластичные фартуки (экраны) – интенсификаторы [2]. Схема экспериментального стенда валковой сортировки с подвижными фартуками представлена на рис. 1.

Эксперименты проводились с целью оценки интенсификации процесса грохочения гравия при установке подвижных фартуков. В ходе этих исследований изучалось влияние величины подачи материала на эффективность грохочения и время процесса при следующих параметрах: угол наклона грохота к горизонту – 5°; частота вращения валов – 60 об/мин; скорость движения фартуков – 0,32 м/с; соотношение частиц верхнего класса к нижнему – 30% : 70% соответственно; варьирование подачи – 1,875...

5 кг/с.

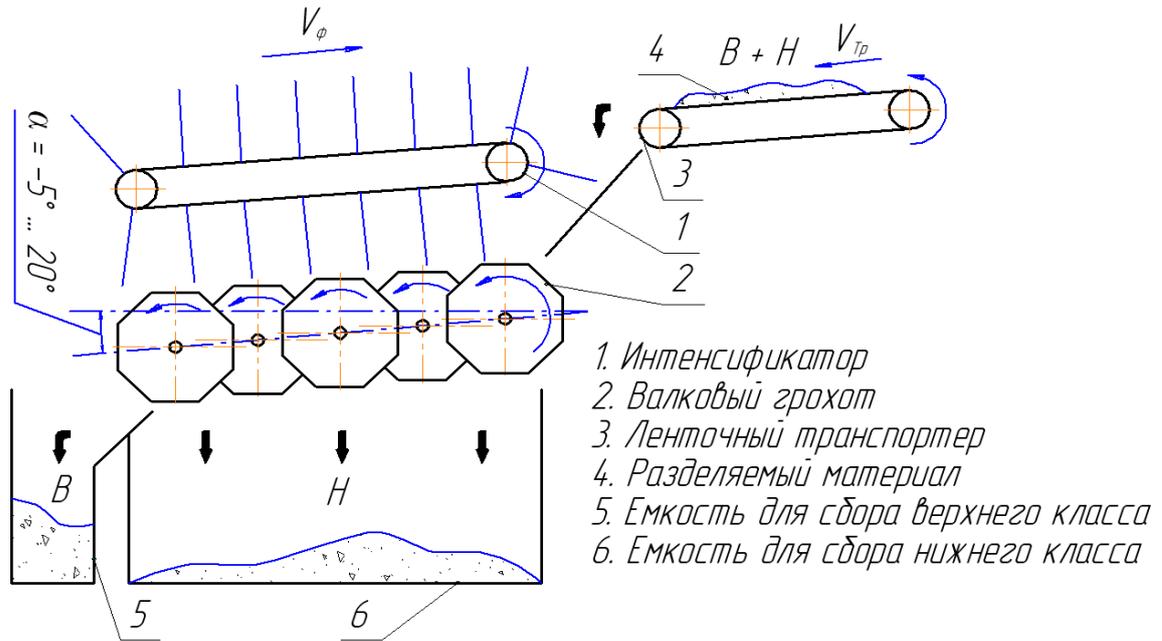


Рис. 1. Принципиальная схема процесса грохочения на сортировке с подвижными фартуками

Результаты сравнительных испытаний представлены на рис. 2. На сортировке с фартуками с увеличением подачи эффективность падает медленнее, при этом E на 5...10% выше по сравнению с сортировкой без фартуков (верхние линии). Одновременно происходит увеличение времени процесса грохочения, но на сортировке с фартуками t на 3...7 с меньше во всем диапазоне изменения q , т.е., на 25–37% (нижние линии). Поэтому, целесообразность размещения над просеивающей поверхностью вращающихся валов с дисками интенсификатора не вызывает сомнений.

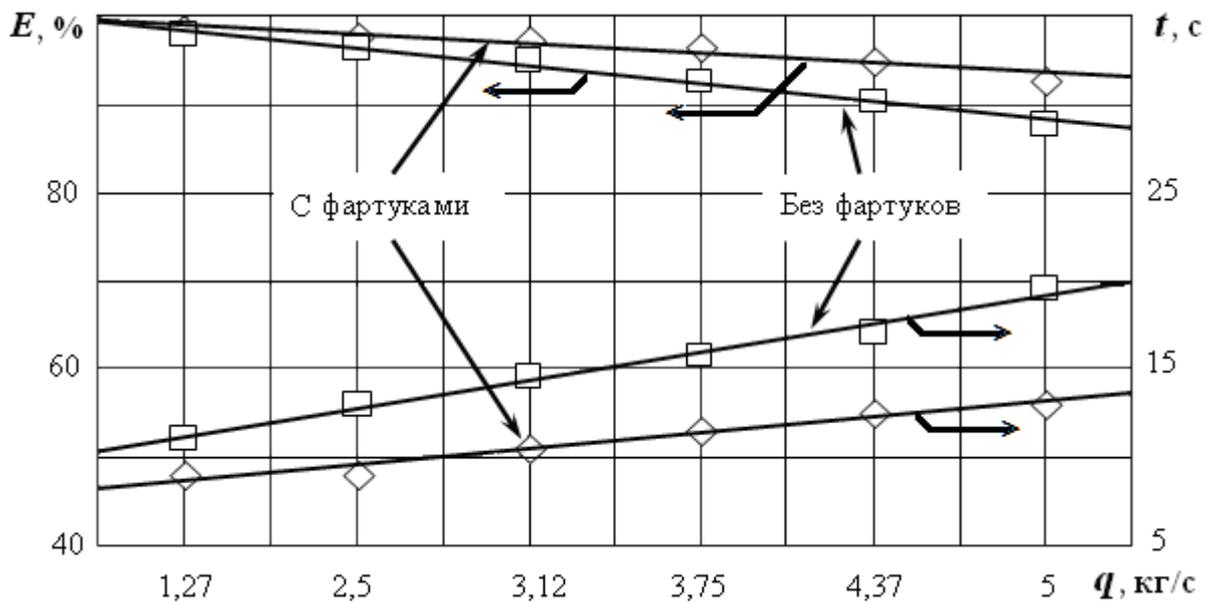


Рис. 2. Сравнение показателей E и t на сортировке с фартуками и без них

Однако, из практики применения валковых грохотов известно, что при работе с абразивным материалом выступающие грани многогранных дисков достаточно быстро истираются и форма диска становится круглой. Поэтому целью последующего исследования являлось изучение влияния формы дисков (восьмигранной и круглой) на эффективность и время грохочения каменных материалов на валковой сортировке с подвижными фартуками. Эксперименты проводили при изменении подачи q от 1,87 до 5,62 кг/с.

Таблица 2. Зависимость эффективности и времени грохочения от подачи материала на сортировку

Параметр	Форма дисков			
	Восьмигранная		Круглая	
q , кг/с	E , %	t , с	E , %	t , с
1,87	99	8	99,5	13
3,12	95	9	99	15
4,37	90	11	98,5	18
5,62	85	13	97,5	21

Результаты исследований приведены в таблице 2, из которой видно, что увеличение подачи материала на сортировках приводило к снижению эффективности грохочения и повышению времени процесса разделения гравия. На устройстве с восьмигранными дисками эффективность становилась ниже 90% с увеличением подачи более 4,37 кг/с, а на стенде с круглыми дисками во

всем диапазоне изменения q эффективность E была высокой – более 97%. Время процесса грохочения на сортировке с круглыми дисками росло быстрее из-за худшей транспортирующей способности дисков по сравнению с восьмигранной формой.

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение валковой сортировки позволяет существенно интенсифицировать процесс грохочения каменных материалов. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- валковая сортировка опережает виброгрохот по эффективности грохочения гравия в среднем на 12%, при этом время процесса уменьшается в 3 раза;

- установка подвижных фартуков над вращающимися дисками позволяет увеличить в среднем на 8% эффективность и снизить на 30% время процесса грохочения;

- с изменением формы дисков при их истирании будет наблюдаться повышение эффективности грохочения с одновременным увеличением времени процесса разделения, что соответственно объясняется уменьшением траектории отбрасывания материала от поверхности сита и ухудшением транспортирующих способностей дисков;

- сокращение времени протекания процесса грохочения (увеличение производительности) на сортировке с круглыми дисками можно достичь за счет повышения скорости перемещения подвижных фартуков и возможного уменьшения частоты их расстановки, т.е., еще большее перенесение части транспортирующих функций с дисков на подвижные фартуки.

Проведение дальнейших исследований по оптимизации параметров валкового грохота с круглыми дисками и интенсификатором позволит проектировать сортировки с рациональной формой дисков наиболее устойчивой к износу при разделении абразивных материалов.

Библиографический список

1. Кабалкин, В.А. Машины для сортировки каменных материалов (грохоты) / В.А. Кабалкин. Изд-во Сарат. ун-та, 1981. 96 с.
2. Патент № 2004095. Сортирующе-транспортирующее устройство / А.В. Кондратьев, А.Б. Мясников, С.М. Кочкьян, Е.И. Иванов, М.Н. Пупенков // Открытия. Изобретения. 1993. № 45-46.

УДК 621.311:658.26

Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх, В.Г. Бурдо, С.Р. Испирян
Тверской государственный технический университет

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

В статье изложены результаты исследований информационных функций, структуры и моделей интеллектуальной автоматизированной системы управления технологическими процессами в единичном и мелкосерийном механообрабатывающем производстве.

Ключевые слова: автоматизированное управление технологическими процессами, искусственный интеллект, системный анализ

AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

The paper describes the results of research of information functions, structure and models of automated control system with the elements of artificial intelligence for technological processes in single-part and short-series production.

Key words: automated design system for technological processes, system analysis, artificial intelligence.

Внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) является одним из средств, позволяющих в единичном и мелкосерийном производстве обеспечить работу по принципу «точно вовремя» [1]. Актуальность такой задачи объясняется слабо развитой нормативной базой, низкой структуризацией процессов управления, отсутствием учета динамики ситуации, складывающейся в технологических подразделениях ($T_x\Pi$) данных типов производств.

1. Принципы построения и функции АСУТП

Авторами ранее были выявлены виды функций АСУТП в условиях единичного и мелкосерийного производства [2]. Разработана структура АСУТП, отвечающая установленным принципам ее создания: 1) единства

и взаимосвязи; 2) одновременности; 3) непрерывности; 4) гибкости; 5) точности; 6) оперативности; 7) эвристичности; 8) относительной оптимальности; 9) участия [2].

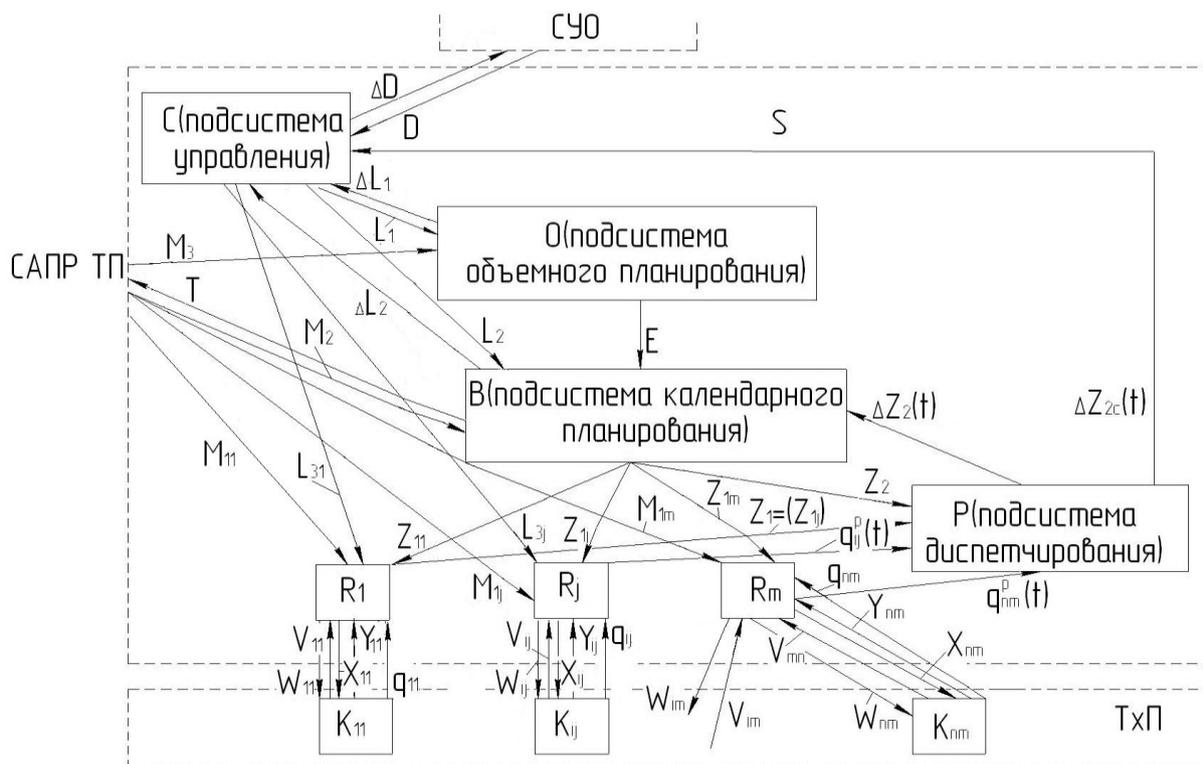
2. Теоретико-множественная модель АСУТП

Для алгоритмизации работы АСУТП был применен системный подход и рассмотрена теоретико-множественная модель АСУТП, как части интегрированной системы (ИС) САПР ТП-АСУТП (рис.).

$T_x\Pi$ являются управляемыми АСУТП подсистемами, состоящими из различных подсистем – участков. Управляющая система S представляет собой совокупность операторов, реализующих систему управления $T_x\Pi$. $T_x\Pi$ осуществляют преобразование предметов производства в соответствии с алгоритмами, задаваемыми командами $\{w_{ij}\}$ операторам $\{R_j\}$. Операторы $\{R_j\}$ предназначены для управления работой непосредственно на рабочих местах и получения информации о ходе работ ($\{R_j\} = \{R_1, R_2, R_j, R_m\}$). Реализуются линейными мастерами, отвечающими за работу подчиненных им элементов $\{\{K_{ij}\}_j\}$, причем обязательно условие:

$\bigcup_{i=1}^M \{K_{ij}\}_j = \{K_{11}, K_{n1}, K_{\dots}, K_{n2}, \dots, K_{ij}, \dots, K_{mn}\}$, $\bigcap_{j=1}^m \{K_{ij}\}_j = \emptyset$, т.е. управляемыми должны быть

все подразделения, но одновременно подчинения несколькими операторами из множества $\{R_j\}$ не допускается. Каждым оператором R_j управляются подразделения $K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{ij}, \dots, K_{nj}$ образующие множества $\{K_{ij}\}_j$, и выполняется несколько функций.



Структурная схема АСУТП

Первая из них, R_{1ij} выполняет функцию контроля над технологической дисциплиной в каждом из подчиненных оператору R_j , i -х: $R_{1ij}: M_{1j} \times V_{ij} \rightarrow W_{ij}$, где M_{1j} – множество параметров, описывающих технологии для $\{K_i\}_j$ участков Т_хП в технологической документации (ТД) (передаются от САПР ТП); V_{ij} – множество параметров, описывающих фактическое выполнение технологий на i -м участке; W_{ij} – множество управляющих воздействий, вводящих технологии на участке в рамки, оговоренные ТД. Тогда, совокупная функция $\{R_{1i}\}_j$ по всем подчинённым оператору R_j i -м участкам $R_{1j}: \{R_{1i}\}_j: M_{1j} \times \{V_i\}_j \rightarrow \{W_i\}_j$; $\{R_{1i}\}_j = \cup_i R_{1ij} = R_{1j}$, где $\{V_i\}_j$ – множество параметров, описывающих фактическое выполнение технологий на всех ij -х участках ($i=1,2,i,\dots,n$); $\{W_{ij}\}_j$ – множество управляющих воздействий, вводящих технологии на ij -х участках управляемых R_j в состояние, оговоренное ТД.

Вторая частная функции операторов $\{R_j\}$ управляет распределением работ по рабочим местам участков Т_хП. По каждому i -му участку вторая функция оператора $\{R_j\}: R_{2ij}: Z_{1ij} \times M_{1j} \times Y_{ij} \times L_{3j} \rightarrow X_{ij}$, где L_{3j} – управляющие воздействие от управляющей подсистемы (УП) с целью приведения календарного плана-графика (КПГ) к расчетному данному участку; Z_{1ij} – множество параметров, описывающих КПГ выпуска деталей, узлов и изделий исходя из планового числа рабочих мест на i -м участке, подчиненному j -му оператору R_j ; $\{Z_{1i}\}_j = \cup_i Z_{1ij} = Z_{1j}$, Z_{1j} – множество параметров КПГ выпуска деталей, узлов и изделий на всех i -х участках, управляемых оператором R_{2j} ; M_{1j} – множество параметров, характеризующих маршрутную технологию изготовления деталей, узлов и изделий на i -м участке, получаемых от САПР ТП; Y_{ij} – множество параметров, характеризующих загрузку и число фактических рабочих мест в пределах групп оборудования на i -м участке; X_{ij} – множество параметров, характеризующих управляющие воздействия, приводящие фактическое выполнение КПГ в соответствии с расчётным на i -м участке с учётом загрузки рабочих мест в пределах групп оборудования.

Функция оператора R_{2j} по всем подчинённым ему подразделениям, $\{R_{2i}\}_j: \{R_{2i}\}_j = \{Z_{1i}\}_j \times \{M_{1i}\}_j \times \{Y_i\}_j \times \{L_{3i}\}_j \rightarrow \{X_i\}_j$, где $\{L_{3i}\}_j = \cup_i L_{3ij} = L_{3j}$ – множество управляющих воздействий от УП с целью приведения в соответствии с КПГ работу всех участков, подчинённых R_j ; $\{M_{1j}\}_i = \cup_i M_{1ij} = M_{1j}$ – множество параметров, характеризующих ТП изготовления изделий на всех i -х участках, подчиненных оператору R_j ; $\{Y_i\}_j = \cup_i Y_{ij} = Y_j$ – множество параметров, характеризующих загрузку и число фактических рабочих мест в пределах групп оборудования на i -х участках, управляемых R_j ;

$\{X_i\}_j = \cup_i X_{ij} = X_j$ – множество параметров, характеризующих управляющие воздействия оператора R_j по всем участкам $T_x\Pi$, приводящие фактическое выполнение КПП в соответствии с расчётным, с учётом загрузки рабочих мест по всем группам станков на всех i -х участках. $\{R_{2i}\}_j = \cup_i R_{2ij} = R_{2j}$, $R_{2j} = M_{1j} \times Y_j \times Z_{1j} \times L_{3j} \rightarrow X_j$.

Третья функция операторов $\{R_j\}$ связана с предоставлением необходимой информации о ходе выполнения КПП в систему диспетчирования. Необходимо оговориться, что указанная функция может выполняться линейными мастерами (как в нашей схеме), так и диспетчерами подсистемы Р (в зависимости от организации системы диспетчирования). Функция R_{3ij} в рамках каждого участка $T_x\Pi$: $R_{3ij} : Z_{1ij} \times q_{ij}(t) \rightarrow q_{ij}(t)$, где $q_{ij}(t)$ – множество параметров, описывающих фактическое число рабочих мест и выполнения КПП на i -м участке по выпуску изделий, управляемого оператором R_j ; $q_{ij}^p(t)$ – то же самое, но в принятой в подсистеме (операторе) Р форме, индекс t в скобках обеих величин означает, что данные вводятся в строго оговоренные временные интервалы.

Комплекс третьих функций оператора R_j по всем подчиненным ему участкам (элементам) $T_x\Pi$: $\{R_{3i}\}_j = \cup_i R_{3ij} = R_{3j} : Z_{1i} \times \{q_i\}_j(t) \rightarrow \{q_i\}_j^p(t)$, где $\{q_i\}_j(t) = \cup_i q_{ij}(t) = q_j(t)$ – множество параметров, описывающих фактическое число рабочих мест и выполнение КПП на i -х участках, управляемых оператором R_j ; $\{q_i\}_j^p(t) = \cup_i q_{ij}^p(t) = q_j^p(t)$ – то же самое, но в принятой в подсистеме диспетчирования форме.

Рассмотрим функции подсистемы диспетчирования Р. Первая из них P_1 связана с оценкой выполнения КПП по всем участкам $T_x\Pi$ в целом: $P_1 : Z_2 \times \{\{q_i\}_j^p\}_j(t) \rightarrow \Delta Z_2(t)$, где Z_2 – множество параметров, характеризующих плановый КПП и плановое число рабочих мест по $T_x\Pi$ в целом в форме, необходимой для подсистем Р, $\{\{q_i\}_j^p\}_j(t) = Q^p(t)$; ΔZ_2 – множество параметров, характеризующих отклонения КПП и числа рабочих мест от планового по всем участкам $T_x\Pi$.

Вторая функция предназначена для передачи аналогичной информации в подсистему с (начальным производством) в удобном для пользователя виде: $P_2 : Z_2 \times Q^p(t) \rightarrow \Delta Z_2^c(t)$, где $\Delta Z_2^c(t)$ – множество параметров, характеризующих отклонения от КПП и числа рабочих мест от планового по всем участкам $T_x\Pi$.

Первые две функции подсистемы В из них связаны с разработкой множеств параметров, характеризующих КПП для операторов $\{R_j\}$ и Р:

$B_1: E \times M_2 \times L_2 \rightarrow Z_1$; $B_2: E \times M_2 \times L_2 \rightarrow Z_2$, где E – множество параметров, характеризующие номенклатуру изготавливаемых изделий с указанием календарных сроков их изготовления (объемные планы); M_2 – множество параметров, характеризующих маршруты изготовления изделий с указанием времен их выполнения (штучно-калькуляционное время, подготовлено заключительное время и т.д., сведения по используемому в операции инструменту), передаваемые от САПР ТП; L_2 – множество параметров, определяющих уточнения и корректировки для оператора В (указания о необходимости или отказе от пересчета календарных планов, их утверждение, предельные календарные сроки в КПП по изделиям, плановая численность рабочих мест).

Функция B_3 определяет отличие расчетного КПП от задаваемого множеством параметров L_2 : $B_3: E \times M_2 \times L_2 \times \Delta Z_2(t) \rightarrow \Delta L_2$, где ΔL_2 – множество параметров, характеризующих отклонения по срокам выполнения расчетного КПП от задаваемых в множестве L_2 .

Функция B_4 определяет фактическую загрузку оборудования по типам и группам оборудования участков: $B_4: E \times M_2 \times L_2 \times \Delta Z_2(t) \rightarrow T$, где T – множество параметров, определяющих фактическую загрузку оборудования по группам на момент времени t (т.е. учётом фактической численности рабочих, прохождения деталей по станкам и т.д.)

Функции оператора О (подсистема объёмного планирования) следующие. Функция O_1 определяет исходные параметры для расчёта КПП: $O_1: L_1 \times M_3 \rightarrow E$, где L_1 – множество параметров, определяющих перечень изделий, изготавливаемых за определенный календарный период (задаваемый объёмный план), плановую численность рабочих мест; M_3 – множество параметров, определяющих трудоёмкости изделий по видам работ.

Функция O_2 определяет расчётные отклонения от задаваемого объёмного плана: $O_2: L_1 \times (L_1 \times M_2) \rightarrow \Delta L_1$, где ΔL_1 – множество параметров, характеризующих отличие расчётного объёмного плана от задаваемого.

Подсистема управления (С) реализует следующие функции. Первая определяет объем задания для подсистемы О (объёмный план) и может быть реализована в следующих вариантах: $C_1^1: D \rightarrow L_1$, где D – множество параметров, определяющих перечень и календарные сроки выпуска изделий. Данная подфункция реализуется при первоначальном формировании плана объёмного выпуска изделий (по номенклатуре). Вторая подфункция $C_1^2: C_1^2: D \times \Delta L_1 \rightarrow L_1$. Используется при итерационных процедурах уточнения рассчитанного плана объёмного выпуска изделий. Третья подфункция $C_1^3: C_1^3: D \times \Delta L_2 \rightarrow L_1$. Используется при уточнении плана объёмного планирования путём итерации на основе анализа сформированного КПП. Четвертая

подфункция C_1^4 реализуется при уточнении объемного плана на основе оценки выполнения КПП на рабочих местах Т_хП: $C_1^4 : D \times \Delta Z_2^c(t) \rightarrow L_1$.

Вторая функция определяет управляющие воздействия на подсистему В и имеет несколько подфункций. Первая из них: $C_2^1 : D \rightarrow L_2$, и определяет предельные календарные сроки L_1 выпуска определенных изделий и другие ограничения по разрабатываемому КПП.

Вторая подсистема C_2^2 функций реализуется при уточнении сформированного КПП на основе анализа его отличий ΔL_2 от указания L_2 путём итерационных процедур: $C_2^2 : D \times \Delta L_2 \rightarrow L_2$.

Третья подфункция C_2^3 определяет управляющие воздействие L_2 на основе анализа реализации КПП в Т_хП: $C_2^3 : D \times \Delta Z_2^c(t) \rightarrow L_2$.

Третья функция C_3 осуществляет обратную связь с системой управления организацией более высокого уровня. Первая подфункция имеет вид: $C_3^1 : \Delta L_1 \rightarrow \Delta D$, где ΔD – множество параметров, описывающих отклонения от планового задания D по срокам и номенклатуре изделий на основе анализа сформулированного объемного плана.

Вторая подфункция определяет возможные отклонения ΔD на основе анализа формирования КПП: $C_3^2 : D \times \Delta L_2 \rightarrow \Delta D$.

Третьей функцией подсистемы C_3^3 определяются возможные отклонения ΔD на основе анализа результатов работы Т_хП: $C_3^3 : D \times \Delta Z^c(t) \rightarrow \Delta D$.

Четвертая подфункция C_4^1 служит для прямого управления работой операторов $\{R_j\}$ с целью приведения в соответствие КПП, и охватывает организационную сторону управления: $C_4^1 : D \times Z_2^c(t) \times \Delta L_2 \times D \rightarrow L_3$; $L_3 = \{L_{3j}\}$.

Заключение

Таким образом, в АСУТП реализованы три вида обратных связей: по объемному плану, КПП и результатам диспетчирования. Кроме того, АСУТП имеет обратные связи с САПР ТП и с СУО (ΔD). Наличие этих связей является достаточным для управления всеми подсистемами АСУТП и ИС в целом, учитывая степень формализации проектных процедур.

По мере накопления практического опыта, обратные связи внутри АСУТП могут быть перераспределены: часть связей ΔL_2 (от подсистемы КПП к подсистеме С) может быть замкнута на подсистему О, а некоторые параметры связи $\Delta Z_2^c(t)$ передаваться в подсистемы В и О.

Результаты исследования позволили разграничить функции подсистем, оптимизировать информационные потоки и разработать формальные алгоритмы процедур на основе нечеткой логики. Предложенная методика и разработанные программные средства реализуются [3–5] на одном из предприятий г. Твери, изготавливающем геофизические приборы малыми партиями.

Библиографический список

1. Вумек Джеймс П. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Вумек Джеймс П., Джонс Даниел Т. М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. 716 с.
2. Бурдо, Г.Б. Принципы построения автоматизированной системы управления технологическими процессами в многономенклатурных производствах / Г.Б. Бурдо // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. № 3 (48). С. 113–118.
3. Бурдо, Г.Б. Интеллектуальная система управления технологическими процессами в многономенклатурном машиностроительном производстве / Г.Б. Бурдо // Проблемы информатики. 2011. № 1 (9). С. 51–55.
4. Бурдо, Г.Б. Оперативное планирование на основе приоритетных схем в производственных системах геофизического приборостроения / Г.Б. Бурдо // Каротажник. 2011. № 6 (204). С. 92–100.
5. Св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011612834. Управление технологическими процессами / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх, А.Н. Баженов; зарег. в реестре программ для ЭВМ 08.04.11.

УДК 621.311:658.26

Г.Б. Бурдо, А.А. Исаев, В.Г. Бурдо, Н.В. Испирян
Тверской государственной технической университет

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА В МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Приводится анализ условий проведения технологической подготовки производства изделий в геофизическом приборостроении. Обоснована информационная модель технологических подразделений, обеспечивающая учет динамики производственной системы. Предложены принципы построения САПР ТП, позволяющие реализовать предлагаемую информационную модель технологических подразделений.

Ключевые слова: Система автоматизированного проектирования технологических процессов, геофизическое приборостроение, искусственный интеллект, единое информационное пространство.

AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION IN MULTISCALE PRODUCTION

The analysis of conditions of technological preparation of production products in geophysical instrument-making industry has been presented. The information model of technological departments, providing accounting dynamics of the production system, is substantiated. The principles of the CAD system of technological process for implementation of the proposed information model of technological units are proposed.

Key words: System of automated design of technological processes, geophysical instrument-making, artificial intelligence, unified information space.

Подавляющее большинство научно-производственных фирм геофизического приборостроения (ГФП), исходя из номенклатуры и объемов выпуска изделий, можно с уверенностью отнести к предприятиям.

Известно, что особенности единичного и мелкосерийного производства, обусловленные сжатыми сроками на выполнение одновременно большого числа контрактов, предопределяют упрощенное проведение технологической подготовки производства (в том числе и наиболее важной и трудоемкой её задачи – проектирование технологических процессов механической обработки) и, по существу, выполнение её рабочими и мастерами.

Поэтому качество спроектированных технологий, наряду с конструкцией изделий определяющих конкурентоспособность продукции, оставляют желать лучшего. Принципиальные затруднения возникают и при внедрении оборудования с числовым программным управлением (чисто инженерная область деятельности), систем управления технологическими процессами (отсутствие точных данных по временам выполнения операций).

Следовательно, разрешение противоречия между качеством технологической подготовки производства и весьма ограниченными временными периодами её выполнения, важно для динамичных производственных систем геофизического приборостроения.

Принципы проектирования технологических процессов в динамичных производственных системах

Одним из наиболее эффективных методов разрешения указанного противоречия является разработка и внедрение автоматизированных систем проектирования технологических процессов (САПР ТП), построенных на определенных принципах [1].

Исходными данными для проектирования технологий в САПР ТП являются: 1) функция технологического процесса (ТПр) φ ($\varphi: C_O \rightarrow C_K$), где C_O , C_K – информационные описания заготовки и готовой детали; 2) программа выпуска N ; 3) календарные сроки выпуска детали; фактическое состояние ТП. В функции φ известной является информационная модель готового изделия (детали) C_K [2, 3]. Известны и технические ограничения, накладываемые производственными системами (ПС) [2–4]: методы получения заготовок, методы обработки поверхностей деталей, оборудование в ПС, средства технологического оснащения и т.д.

В тоже время вниманием обходится тот факт, что фактическое состояние и изменения в ПС должны находить отражение в видоизменении алгоритмов проектирования. К сожалению, большинством авторов учет фактического состояния в ПС сводится к корректировке баз данных (мало динамичный параметр), и не учитывает организационные аспекты (высоко динамичный атрибут).

Это связано с тем, что задача проектирования технологий не трактовалась как *организационно-технологическая*, не рассматривалась возможность создания предпосылок эффективного управления ПС на этапе технологической подготовки производства.

Различие конструкторско-технологических характеристик деталей, изготавливаемых на предприятиях ГФП, разнообразный состав оборудования средств технологического оснащения, непредсказуемые состояния ТП (по загрузке, фактической численности рабочих, появлению новых заказов и т.п.) приводит нас к пониманию того факта, что проектирование ТПр является малоформализованной, многовариантной *организационно-технологической* задачей, решаемой в условиях информационной неопределенности.

В настоящей работе показан на основе сформулированных ниже принципов подход к созданию САПР ТП, способных к перестройке алгоритмов на основе обобщения опыта проектирования и оценки текущей ситуации в ПС. Для оценки текущей ситуации необходимо в качестве параметров фактического состояния ПС ($ПС^{\phi}$) использовать загрузку оборудования по типам и группам.

Для реализации возможности обобщения опыта проектирования необходимо сравнение фактического состояния изделия C_{kf} после реализации технологии с информационной моделью этого состояния изделия C_k ; это при неоднократном их совпадении позволит применять в САПР ТП накопленные и обобщенные решения.

Важным является и учет в САПР ТП целевой функции (ЦФ) конкретного изготавливаемого заказа. Авторы [2–6 и др.] считают, что ЦФ должна являться минимальная технологическая себестоимость, C_{\min} . Точка зрения справедлива при устоявшейся номенклатуре выпуска, что нехарактерно для ГФП. Рассмотрим еще две ЦФ – максимальный выпуск изделий за единицу времени (Q_{\max}) и минимум времени цикла выпуска партии деталей (T_{\min}). Выбор Q_{\max} целесообразен в случае срочного выпуска изделий при ТПр в 1–3 операции. Выбор целевой функции T_{\min} следует осуществлять в случае срочного выпуска изделий, и ТПр более 3 операций. Различие между Q_{\max} и T_{\min} – второй критерий учитывает временные потери всех видов, а не только подготовительно-заключительное время. При выборе одного из них C_{\min} целесообразно в моделях перевести в технико-экономическое ограничение $C \leq C_3$.

При выборе в качестве целевой функции C_{\min} следует модели дополнить технико-экономическими ограничениями $Q \geq Q_3$ или $T \leq T_3$, Q_3 и T_3 – заданные величины штучной производительности и времени цикла выпуска изделий.

Таким образом, технические ограничения (TO), параметры фактического информационного состояния ПС ($ПС^\phi$) и изделия $C_{кф}$, технико-экономические ограничения ($ТЭО$) представляют собой предлагаемую модель технологических подразделений ($M_{ТП}$), в рамках которой реализуется ТПр и обеспечивается организационно-технологическое проектирование:

$$M_{ТП} = \{TO, ПС^\phi, C_{кф}, ТЭО\}. \quad (1)$$

Параметры $ПС^\phi$ – загрузка оборудования по типам (группам), определяемая как отношение суммы станкочасов работ, запроектированных на данную группу (тип) оборудования в соответствии с календарным планом, отнесенной к соответствующему месячному фонду времени работы оборудования (по данным от системы управления ТПр). В свою очередь $ТЭО$:

$$ТЭО = \{(C \leq C_3) \underset{\vee}{\vee} (T \leq T_3) \underset{\vee}{\vee} (Q \geq Q_3)\}, \quad (2)$$

где “ $\underset{\vee}{\vee}$ ” – знак строгой дизъюнкции.

Заключение

В ООО «Нефтегазгеофизика» при разработке программных средств САПР ТП используется показанный в настоящей работе методологический подход, основанный на следующих *принципах*, обеспечивающих реализацию предлагаемой модели технологических подразделений.

1. Учет изменения параметров, описывающих фактическое состояние в ПС.
2. Накопление опыта проектирования (обучение).
3. Реализация системного подхода, рассматривающего САПР ТП как многоагентную иерархическую систему, а САПР ПС как агент ПС.
4. Интеграция в единое информационное пространство, т.е. интеграция с системами управления ТПр.

Принципы 1 и 2 обеспечивают реализацию элементов искусственного интеллекта при создании САПР ТП.

Опыт эксплуатации программных средств [7, 8] показал возможность их быстрого реагирования на изменение производственной ситуации в обрабатывающих подразделениях, обеспечил на 60–80% сокращение времени разработки технологических процессов и управляющих программ для станков с ЧПУ, и равномерную загрузку оборудования по времени.

Библиографический список

1. Бурдо, Г.Б. Теоретические основы комплексной автоматизированной системы проектирования и управления технологическими процессами в многоэшелонном производстве / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия технические науки. 2010. № 4 (127). С. 44–54.

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

3. Цветков, В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / В.Д. Цветков. Минск: Наука и техника, 1979. 264 с.

4. Кондаков, А.И. САПР технологических процессов/ А.И.Кондаков. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 272 с.

5. Горанский, Г.К. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / Г.К. Горанский, Л.В. Губич, В.И. Махнач [и др.]. Минск: ИТК АН Беларусь, 1997. 276 с.

6. Евгеньев, Г.Б. Интеллектуальные системы проектирования / Г.Б. Евгеньев. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 334 с.

7. Св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011612834. Управление технологическими процессами / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх, А.Н. Баженов; зарег. в реестре программ для ЭВМ 08.04.11.

8. Св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2010614613. Моделирование размерной структуры технологического процесса / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх, А.Н. Баженов; зарег. в реестре программ для ЭВМ 13.06.10.

УДК 621.86

В.Ю. Анцев,
Тульский государственный университет,
П.В. Витчук, Е.А. Плахова
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

ВЗАИМОСВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССАЖИРОПОТОКА ЗДАНИЯ И ИЗНОСА ЛИФТОВЫХ КАНАТОВЕДУЩИХ ШКИВОВ

Рассмотрена взаимосвязь между характеристиками пассажиропотока и износом канатоведущего шкива.

Ключевые слова: пассажиропоток, интенсивность износа.

THE CORRELATION OF CHARACTERISTICS OF A PASSENGER TRAFFIC OF A BUILDING AND A WEAR OF ELEVATOR ROPE DRIVING PULLEY

The correlation of characteristics of a passenger traffic and a wear of elevator rope driving pulley has been studied.

Key words: passenger traffic, wear rate.

Интенсивность износа ручьев обода канатоведущих шкивов (КВШ) определяется величиной упругого скольжения и уровнем контактных давлений между канатами и поверхностью ручьев обода. Первоначальные расчетные зависимости для определения интенсивности изнашивания учитывали влияние на нее только твердости. Однако И.В. Крагельским показано [1], что на процесс изнашивания влияют следующие факторы: удель-

ная нагрузка (номинальное давление), упругие свойства материала (модуль упругости), прочностные свойства материала (параметр фрикционной усталости и показатель кривой фрикционной усталости при упругом контакте), фрикционные свойства сопряжения (коэффициент трения), шероховатость и волнистость поверхностей, температурно-скоростной фактор. В общем виде величина износа поверхности определяется зависимостью:

$$h_u = I \cdot L_{mp},$$

где I – линейная интенсивность изнашивания; L_{mp} – путь трения.

В любой момент времени длина линии контакта между канатом и КВШ определяется величиной дуги:

$$l = \frac{\pi \cdot D}{2} \alpha.$$

За время работы лифтовой лебедки канат контактирует с поверхностью обода КВШ на некоторой длине L . Предположим, что износ протекает равномерно по всей длине обода, то есть за любое количество рейсов лифта его КВШ совершает целое число оборотов. В этом случае путь трения составит:

$$L_{mp} = \frac{l}{l_{кви}} L = \frac{\pi D \alpha}{2\pi D} L = \frac{L \alpha}{2},$$

где $l_{кви} = \pi D$ – длина окружности КВШ.

Для определения величины L за период эксплуатации лифта необходимо знать непосредственное время работы лифтовой лебедки и долю этой величины в общем времени эксплуатации лифта. В этой связи требуется аналитически оценить характеристики пассажиропотока здания. Основными такими характеристиками являются: интенсивность пассажиропотока, время ожидания кабины на этаже и время кругового рейса кабины [2]. Сложностью при определении указанных параметров является то, что нагрузка лифтового оборудования зданий и сооружений изменяется во времени по случайному закону.

В настоящее время применяются два метода оценки характеристик пассажиропотока здания: метод моделирования и метод калькуляции. Исходной информацией в обоих случаях является [2–6]:

1. Характеристики здания: количество жильцов на верхних этажах.
2. Характеристики лифта: грузоподъемность кабины; коэффициент заполнения кабины; скорость лифта; время срабатывания тормоза; задержка при пуске привода; величина ускорения/замедления кабины; рывок (темп изменения ускорения/замедления).
3. Статистическая информация: средний вес пассажира (68–80 кг, зависит от действующих строительных нормативов); время входа-выхода пассажира и др.

4. Особые факторы: этажи с ресторанами, банками, конференц-залами, клубами, парковочными стоянками, подвальные помещения, местами для курения и т.п.

Под понятием «время кругового рейса кабины» принято понимать время между двумя последовательными отправлениями вверх кабины одного и того же лифта с основного посадочного этажа (обычно первого). Этот показатель включает в себя время на движение вверх до этажа назначения, поворота и вниз до основного посадочного этажа, а также время на остановки и стоянку на этажах:

$$T = \frac{2H_B - h(N_B + 1)}{V} + 1,1S_t,$$

где H_B – вероятная высота подъема лифта; h – путь, проходимый лифтом при разгоне до номинальной скорости и торможения от номинальной скорости до полной остановки; N_B – число вероятных остановок лифта за круговой рейс выше основного посадочного этажа; S_t – время, затрачиваемое на разгон, торможение, пуск лифта, открывание и закрывание дверей, вход и выход пассажиров.

В свою очередь, при работе лифта в нормальном режиме $H_B = K_H H_{\max}$, а при работе с экспрессной зоной: $H_B = H_э + K_H H_з$, где H_{\max} – высота подъема лифта от уровня пола основного посадочного этажа до уровня пола верхнего обслуживаемого этажа; $H_э$ – высота экспрессной зоны от уровня пола основного посадочного этажа до уровня пола нижней остановки зоны, обслуживаемой лифтами; $H_з$ – высота зоны, обслуживаемой лифтами, от уровня пола нижней остановки до уровня пола верхней остановки; K_H – коэффициент вероятной высоты подъема лифта.

Число вероятных остановок лифта за круговой рейс выше основного посадочного этажа

$$N_B = N_{ВП} + N_{СП}.$$

В свою очередь

$$N_{ВП} = \left[N_1 - N_1 \left(N_1 - \frac{1}{N_1} \right)^{E_{П}} \right] K_{МП}, \quad N_{СП} = \left[N_1 - N_1 \left(N_1 - \frac{1}{N_1} \right)^{E_{С}} \right] K_{МС},$$

где $N_{ВП}$ и $N_{СП}$ – число вероятных остановок лифта выше основного посадочного этажа при подъеме и спуске соответственно; N_1 – число возможных остановок лифта выше основного посадочного этажа при подъеме и спуске соответственно; $K_{МП}$ и $K_{МС}$ – коэффициенты межэтажных перевозок выше основного посадочного этажа при подъеме и спуске соответственно:

$$K_{МП} = a_{5МЭП} / a_{51П}, \quad K_{МС} = a_{5МЭС} / a_{51С},$$

где $a_{5MЭП}$ и $a_{5MЭС}$ – численность пассажиров, перемещающихся между этажами выше основного посадочного на подъем и спуск в течение «пиковых» пяти минут; $a_{51П}$ и $a_{51С}$ – численность пассажиров, поднимающихся с основного посадочного этажа и спускающихся на него в течение «пиковых» пяти минут.

В жилых зданиях массовой застройки межэтажные перевозки практически отсутствуют, то есть можно принять $K_{МП} = K_{МС} = 1$.

Затраты времени на разгон, торможение, пуск лифта, открывание и закрывание дверей, вход и выход пассажиров

$$S_t = (t_1 + t_2 + t_3)(N_B + 1) + t_4 + t_5,$$

где t_1 – затраты времени на разгон лифта до установившейся скорости и торможение от номинальной скорости до остановки; t_2 – затраты времени на пуск лифта; t_3 – затраты времени на открывание дверей; t_4 – затраты времени на вход пассажиров в кабину лифта; t_5 – затраты времени на выход пассажиров из кабины лифта.

Время входа пассажиров в кабину лифта и выхода из нее за круговой рейс

$$t_4 + t_5 = 2D_t(E_{П}K_{МП} + E_{С}K_{МС}),$$

где D_t – время входа и выхода одного пассажира (принимается в зависимости от ширины проема).

После преобразований получим среднесуточное расстояние, проходимое лифтом,

$$L_{СРСУТ} = [2H_B - h(N_B + 1) + 0,55Vt_1]N_{срсут},$$

где $N_{срсут}$ – среднесуточное число рейсов кабины.

За период эксплуатации лифта $T_{эксп}$ (в сутках) путь трения составит:

$$L_{ТР} = [2H_B - h(N_B + 1) + 0,55Vt_1] \frac{\alpha N_{срсут}}{2} T_{эксп},$$

Используя полученное выражение при расчете величины износа ручьев за требуемый срок эксплуатации, можно определить параметры лифтовой канатно-блочной системы с учетом факторов пассажиропотока. Однако следует отметить, что подобный подход дает приемлемые результаты в случае зданий массовой застройки, по которым имеется значительное число статистической информации. В случае проектирования новых конструкций целесообразно применение метода моделирования с использованием вероятностных законов изменения пассажиропотоков.

Библиографический список

1. Крагельский, И.В. Узлы трения машин: Справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. М.: Машиностроение, 1984. 480 с.

2. Финч, Б. Регулировка компьютеризированных систем управления работой лифтов / Б. Финч. Лифт. Научно-технический журнал о лифтах, эскалаторах и канатных дорогах. 2005. № 1(8). С. 13-29.

3. Лифты. Учебник для вузов / Под ред. В.Д. Волкова. М.: Изд-во АСВ, 1999. 480 с.

4. Питерс, Р. Схемы нагрузки пассажирских лифтов / Р. Питерс, П. Мехта. Лифт. Научно-технический журнал. 2004. № 2(1). С. 20-37.

5. Фочн, Д.У. Выбор вызовов из холла по заданному месту назначения для лифтов с двойной платформой (трехмерное кодирование) / Д.У. Фочн. Лифт. Научно-технический журнал о лифтах, эскалаторах и канатных дорогах. 2005. № 11(18). С. 4-10.

6. Кнут, Д. Искусство программирования. Т. 1: Основные алгоритмы / Д. Кнут. М: Вильямс, 2001. 712 с.

УДК 66.083:621.891

С.А. Чаплыгин

Тверской государственный технический университет

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Приводится классификация уплотнительных устройств. Рассмотрен механизм герметизации. Приводятся формулы для расчета утечки через уплотнения. Показано, что наиболее эффективный путь снижения утечки – уменьшение межконтактного зазора путем оптимизации микротопографии поверхности.

Ключевые слова: уплотнение, контактное взаимодействие, межконтактный зазор.

CONTACT INTERACTION IN SEALING DEVICES

The sealing devices classification is described. A sealing mechanism is considered. The formulae for the leakage calculation are presented. It is shown that the most effective way to decrease a leakage is contact gap diminution by the surface microtopography optimization.

Key words: sealing, contact interaction, contact gap.

Уплотнительные устройства (уплотнения) применяют в подвижных и неподвижных соединениях конструкций для разделения сред с различными физическими свойствами и параметрами или уменьшения до допускаемых пределов утечки сред через подвижные или разъемные неподвижные соединения. Условия их эксплуатации весьма разнообразны, поскольку трудно назвать область техники, в которой не возникала бы проблема герметизации. Геофизические приборы не являются здесь исключением, уплотнения являются их неотъемлемой частью. Часто именно уплотнения определяют качественные показатели машин и аппаратов, а также допустимые районы их применения. Неверный выбор уплотнений или их низкое качество и неправильная эксплуатация могут привести к отклонениям показателей работы узлов машин, снижению их надежности, большим экономическим потерям.

Уплотнения можно подразделить на функциональные элементы и представить в виде структурной схемы с указанием взаимосвязей элементов и их зависимости от параметров сред и соединений. Общими элементами уплотнений различных видов являются уплотняемые поверхности стыка соединения и обеспечивающий герметичность уплотнитель. На работоспособность уплотнения влияют эксплуатационные, конструктивные, технологические, технико-экономические и экологические факторы. Важнейшими из них являются: свойства рабочей и окружающей сред, режимы работы, свойства материалов герметизируемого соединения и уплотнителя, допускаемые пределы утечки, ресурс, общий срок эксплуатации, токсичность и химическая агрессивность сред.

По назначению уплотнения подразделяют в соответствии с типом герметизируемого соединения (рис. 1). Неподвижные соединения герметизируют постоянно или периодически действующими уплотнениями (УН). Для герметизации подвижных соединений, передающих вращательное движение, применяют уплотнения типа УВ; для соединений, передающих возвратно-поступательное движение, – УПС; для соединений, передающих более сложные (колебательное, винтовое) движения, – УС. Обычно эти уплотнения постоянно действующие, но иногда необходимы периодически действующие уплотнения, вступающие в работу при аварийных ситуациях. Однако многие уплотнения можно использовать в различных соединениях. Так, эластичные кольца применяют в качестве УН, УПС, УВ и УС. Таким образом, для каждой кинематической пары можно выбрать из уплотнений нескольких типов наиболее оптимальное для данных эксплуатационных условий.

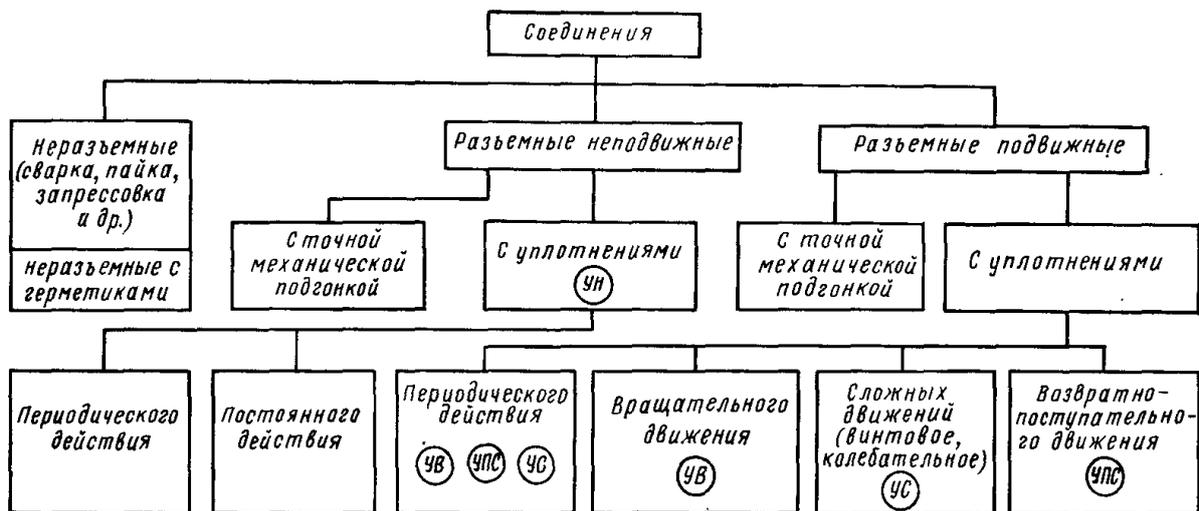


Рис. 1. Типы герметизируемых соединений и индексация уплотнений

Уплотнения неподвижных соединений

Герметизацию неподвижных соединений осуществляют преимущественно контактными, реже диафрагмовыми уплотнениями и уплотнениями с герметиками, а также точно соприкасающимися (притертыми) по-

верхностями. Назначение УН – исключить взаимное проникновение сред (утечки) через соединение при сохранении возможности его разборки. По специфике механизма герметизации контактные УН подразделяют на эластомерные кольца и прокладки, металлические уплотнения линейного контакта, металлические и неметаллические прокладки, газонаполненные кольца и комбинированные уплотнения. Эластомерные пластмассовые и газонаполненные кольца и комбинированные уплотнения устанавливают в замкнутые канавки, что позволяет реализовать эффект самоуплотнения при повышении давления в герметизируемой полости.

В контактных УН механизм герметизации определяется характером контакта уплотняемых поверхностей соединения и уплотнителя, поэтому важное значение имеет шероховатость поверхностей и структура стыка при их сближении под действием сил, создающих контактное давление. Характер контакта жестких поверхностей (металл-металл), эластомеров, пластмасс или композиционных материалов с твердой поверхностью различен.

Уплотнения соединений пар возвратно-поступательного движения

Для герметизации соединений пар возвратно-поступательного движения, применяют следующие уплотнения типа УПС (рис. 2):

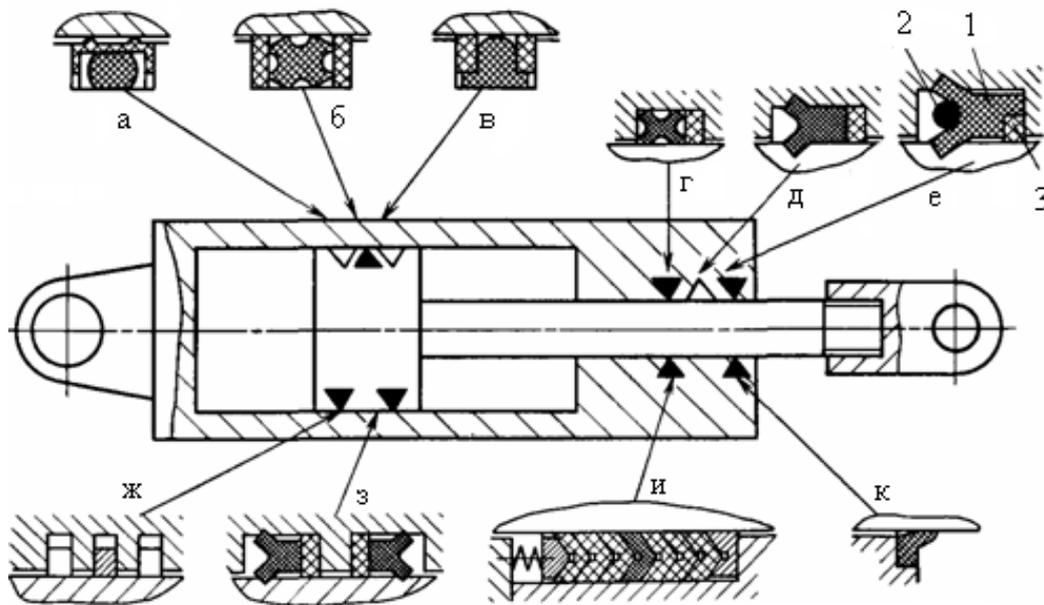


Рис. 2. Уплотнения гидроцилиндров:

- а-в – кольцевые УПС поршней (О-, Х-, Т-образного сечения с защитными кольцами);
- г-е – УПС штока с Х-образным кольцом и манжетами с защитными кольцами;
- ж – поршневые кольца разрезные; з – манжеты с защитными кольцами;
- и – УПС штока с комплектом резинотканевых манжет; к – грязесъемное кольцо

- щелевые и лабиринтные в качестве первой ступени УПС или в соединениях, допускающих большую утечку;

- металлические, углеграфитовые или пластмассовые поршневые кольца во внутренних соединениях, допускающих перетечку сред;
- набивочные для специальных сред;
- эластомерные и комбинированные с кольцами или манжетами в соединениях с высокой герметичностью;
- диафрагмовые разделители при требовании практически полной герметичности;
- грязесъемники со стороны внешней среды.

Области применения и требования к УПС чрезвычайно разнообразны, однако можно выделить два класса машин, в которых эксплуатируется большая часть УПС общепромышленного назначения: 1 – гидро- и пневмоцилиндры, 2 – поршневые машины

Уплотнения соединений пар вращательного движения

Уплотнения соединений пар вращательного движения (УВ), подразделяют на УВ валов, УВ распределителей гидромашин и УВ поворотных соединений (рис. 3).

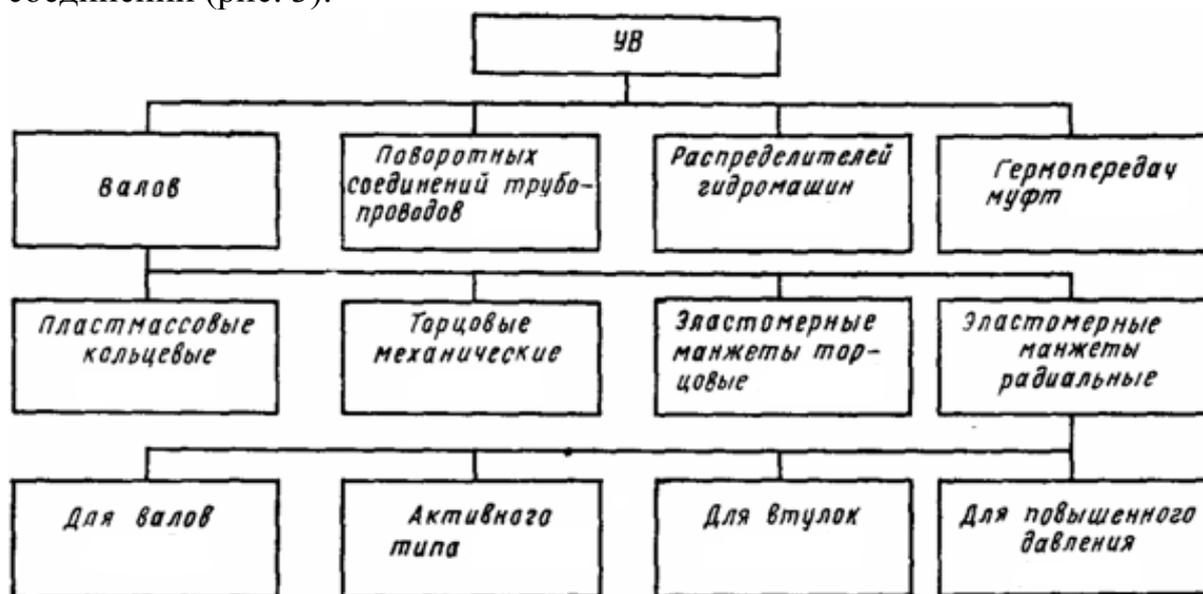


Рис. 3. Классификация УВ

УВ валов. Условия эксплуатации этих уплотнений характеризуются относительно низким давлением ($p \ll 1$ МПа), высокой скоростью скольжения ($< 15...20$ м/с), температурным диапазоном ($-50... + 150^\circ\text{C}$), высокими требованиями к герметичности, которые определяют применение только контактных УВ, малой химической агрессивностью и токсичностью рабочих сред. Кроме того, УВ валов должны быть очень компактны и дешевы при ресурсе 1000...5000 ч. Этому комплексу требований соответствуют эластомерные радиальные манжеты с пружинами. Распространены также пластмассовые (фторопластовые) кольцевые УВ с пружиной, торцовые эластомерные УВ, манжеты с гидродинамическими (маслоотгонными)

рельефами на рабочей кромке. Для закрытых подшипников качения изготавливают беспружинные эластомерные радиальные уплотнения. Большинство манжетных УВ армируют каркасом. Неармированные манжеты применяют, когда в агрегате возможен только торцовый способ установки или по условиям монтажа необходимо деформировать манжету. Отличительной особенностью всех типов манжет при большом разнообразии исполнения корпусов является наличие губки с уплотняющей кромкой. Манжетами обычно называют кромочные эластомерные уплотнения, реже - пластмассовые. Возможности уплотнений этой группы ограничены свойствами эластомерного материала: его температурным диапазоном, старением, износостойкостью, совместимостью со средами, поэтому при эксплуатации УВ в неблагоприятных для эластомеров условиях применяют более дорогие и крупногабаритные торцовые уплотнения.

УВ распределительных устройств гидромашин. Эти устройства обеспечивают коммутацию РЖ из рабочих камер насосов или гидромоторов в магистрали высокого и низкого давления. Их подразделяют на торцовые (аксиальные) и радиальные. УВ радиальных распределительных устройств являются разновидностью бесконтактных щелевых уплотнений, УВ аксиальных распределителей – разновидностью торцовых уплотнений с саморегулируемым зазором.

УВ поворотных соединений. Для герметизации подвижных соединений трубопроводных магистралей, допускающих возвратно-вращательное движение элементов трубопровода, применяют эластомерные, пластмассовые, комбинированные кольца (радиальные УВ) или торцовые уплотнения.

Клапанные уплотнения

Клапанные уплотнения (КУ) или затворы, являющиеся уплотнительными устройствами периодического действия, предназначены для перекрытия потока рабочей среды.

В клапанных уплотнениях наиболее интенсивно протекают процессы эрозионного, динамического и коррозионного разрушения. Конструкция КУ в значительной степени определяет надежность, габаритно-массовые характеристики и энергопотребление агрегатов, арматуры и исполнительных устройств.

Конструктивный фактор является одним из важных – он определяет механизм герметизации и герметичность КУ. Анализ различных конструктивных схем позволяет выделить три основных конструктивных типа КУ:

1. для КУ первого типа характерны притертые уплотнительные поверхности, широкая зона контакта (2...5 мм) и повышенная контактная жесткость;
2. уплотнения с линейным контактом (по линии или ножевым), имеющие малую зону контакта (< 0,5 мм);

3. уплотнения металл – полимер. Обеспечивают высокую степень герметичности при малом контактном давлении. Это позволяет разрабатывать агрегаты и исполнительные устройства с малыми габаритно-массовыми характеристиками и энергопотреблением.

Торцовые уплотнения

Торцовое уплотнение состоит в основном из трех элементов: двух колец (вращающегося и неподвижного), образующих плоскую пару трения, и упругого элемента, обеспечивающего контакт в паре трения (рис. 4). Вращающееся кольцо 3 герметично связано с валом 1 посредством упругого элемента 2, который обеспечивает постоянный плотный контакт колец 3 и 4 при вибрации и смещениях вала, а также износе элементов пары трения. Зазор в паре трения определяет утечки жидкости или газа, находящихся в рабочем пространстве машины, аппарата или механизма 5 под давлением p .

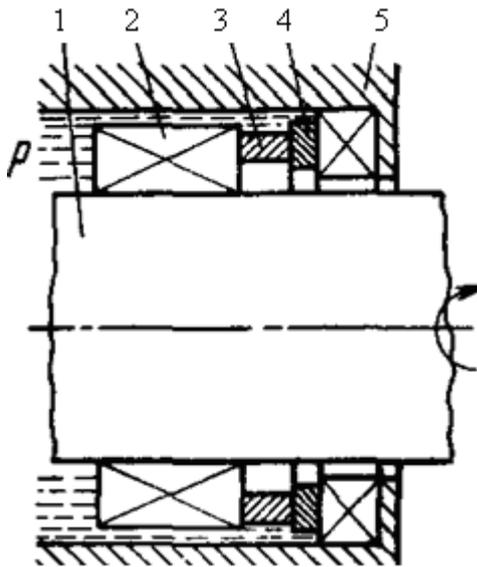


Рис. 4. Принципиальная схема торцового уплотнения

Торцовые уплотнения принято классифицировать по конструктивным особенностям упругих элементов. Эти элементы определяют не только внешний вид, но и динамику торцовых уплотнений. К ним относят пружины с уплотнительными кольцами, сильфоны и мембраны с пружинами или без них. Упругие элементы (на рис. 4 условно обозначены прямоугольниками с диагоналями) бывают вращающиеся и неподвижные. В зависимости от положения упругого элемента по отношению к рабочей среде уплотнения подразделяют на внутренние и внешние. Упругий элемент внутренних уплотнений расположен в рабочей среде, а внешних – снаружи, в окружающем пространстве.

В качестве упругих элементов для торцовых уплотнений всех типов применяют пружины с уплотнительными кольцами или манжетами, а также сильфоны. Мембраны применяют только в качестве неподвижных упругих элементов из-за их больших радиальных размеров.

Выпускают в основном одинарные или двойные (из двух одинарных) торцовые уплотнения. В двойные уплотнения затворная жидкость (газ) подается с давлением, немного превышающим давление среды перед уплотнением. Двойные торцовые уплотнения конструктивно сложнее одинарных, и для их нормальной работы необходимы системы подачи и регулирования давления затворной жидкости, поэтому их применяют гораздо реже. Если к надежности и герметичности уплотнения предъявляют повышенные требования, применяют конструкции из трех и более торцовых уплотнений.

По условиям работы можно выделить четыре группы торцовых уплотнений:

1. уплотнения для химически неагрессивных и слабоагрессивных сред (масел, нефтепродуктов, воды);
2. уплотнения для химически агрессивных сред (кислот, щелочей, растворов солей, паров, газов и различных технологических сред химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности);
3. уплотнения для сред с большим содержанием твердых частиц и включений;
4. специальные уплотнения.

Механизм герметизации

Уплотняемая поверхность представляет собой микрорельеф, на котором неровности создают чередующиеся между собой выступы и впадины. На отдельных участках впадины, сливаясь друг с другом, образуют каналы, по которым может происходить утечка рабочей жидкости. Герметичность, обеспечиваемая контактными уплотнениями, зависит от ширины участка контактной поверхности и от величины внедрения материала уплотнения во впадины микронеровностей на этом участке. Внедрение материала уплотнения в микронеровности, с образованием микрокамер, заполненных жидкостью, обеспечивается контактным давлением, которое вначале искусственно создается при монтаже уплотнения, а затем суммируется с давлением рабочей жидкости.

Для большинства жидкостей утечка через капиллярные каналы диаметром до 0,5 мкм, сохранившиеся после внедрения материала уплотнения в микрокамеры уплотняемой поверхности, не наблюдается. Герметичность в этом случае обеспечивается благодаря явлению облитерации – заращению капиллярных каналов молекулами поверхностно-активных веществ жидкости.

Герметичность при уплотнении эластомерными материалами в значительной мере определяется режимами работы агрегата. Так, при очень малых скоростях движения имеет место граничное трение, при котором глубина внедрения уплотнения в микронеровности уплотняемой поверхности практически не отличается от глубины внедрения при неподвижном контакте. В этом режиме обеспечивается, как правило, максимальная герметичность агрегата. В диапазоне наиболее распространенных в практике скоростей прямолинейного движения (5–30 см/с) уплотнения работают в режиме смешанного – граничного и жидкостного – трения. В этом режиме негерметичность определяется разностью объемов жидкости, заключенной в микрокамерах при движении уплотняемой поверхности в прямом и обратном направлениях. Во время движения в микрокамерах возникает гидродинамическое давление, под воздействием которого материал уплотне-

ния вытесняется из микрокамер. При достижении критической скорости, когда высота микрокамер становится больше высоты неровностей, имеет место переход из режима смешанного в режим жидкостного трения, при котором уплотнение и уплотняемая поверхность разделены слоем рабочей жидкости, толщина которого определяет величину утечки.

Уплотнения, изготовленные из относительно жестких материалов (полиамиды, фторопласт и т.д.), более чувствительны к шероховатости уплотняемой поверхности и поэтому менее герметичны, чем резиновые.

Процесс возникновения утечек при уплотнении вращающихся соединений армированными манжетами связан, в основном, с тем, что с увеличением скорости вращения резина теряет способность копировать микронеровности вала. Этому также способствует биение вала и старение резины под влиянием высоких температур, развивающихся в контактной зоне. Поэтому в нормативных документах оговариваются шероховатость поверхности, допустимое биение вала и материал манжеты.

Если рабочей (уплотняемой) средой является жидкость, то её объемный поток Q_v (м³/с) через кольцевое уплотнение можно оценить по формуле [4]:

$$Q_v = \frac{\pi h^3 (p_2 - p_1)}{6 f_d (1 - \eta_r)^2 \xi^2 \ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (1)$$

где h – высота зазора; p_2 и p_1 – давления на входе и выходе уплотнения; f_d – коэффициент динамической вязкости; $\eta_r = A_r/A_n$ – относительная площадь фактического контакта; ξ – коэффициент, зависящий от шероховатости и деформации контакта; r_2 и r_1 – наружный и внутренний радиусы уплотнения. Коэффициент ξ определяется по формуле

$$\xi = 1 + \frac{S_{non}}{2S_{np}} \cdot \frac{R_{max} - Rp}{R_{max} - y} \left(\frac{y}{Rp} \right)^{v-1}, \quad (2)$$

где S_{non} и S_{np} – шаг неровностей по средней линии в направлении, перпендикулярном течению и совпадающем с течением среды соответственно; R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля; Rp – наибольшая высота неровностей профиля над средней линией; y – деформация контакта; v – параметр кривой опорной поверхности. Если обработка поверхности такова, что $S_{non} \approx S_{np}$, при небольших контактных давлениях, когда $\frac{y}{Rp} \ll 1$,

можно принять $\xi \approx 1$.

Одним из основных параметров, характеризующих течение газообразной рабочей среды через межконтактный зазор, является число Кнудсена $Kn = \lambda/h$, где λ – средняя длина свободного пробега молекул рабочей среды; h – высота зазора. Считается, что при значениях $Kn < 0,01$ течение среды имеет вязкостный характер, при значениях $Kn > 1$ – молекулярный, при $0,01 < Kn < 1$ – переходный.

Объемный поток газа через уплотнение Q_v (м³/с), приведенный к атмосферному давлению, можно оценить по формуле [4]

$$Q_v = \frac{\pi h^3 (p_2^2 - p_1^2) \cdot F(Kn)}{6 f_d p_0 (1 - \eta_r)^2 \xi^2 \ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (3)$$

где p_0 – атмосферное давление; $F(Kn)$ – функция, зависящая от числа Кнудсена; остальные обозначения прежние. Величина $F(Kn)$ определяется выражением

$$F(Kn) = 1 + \frac{\pi + 2Kn}{2 + Kn} \cdot \frac{16Kn}{\pi}. \quad (4)$$

Как следует из уравнений (1) и (3), утечка через уплотнение очень сильно зависит от толщины межконтактного зазора. При контактировании шероховатых волнистых поверхностей толщина зазора складывается из высоты шероховатости и волнистости:

$$h = Wp_1 + Wp_2 + Rp_1 + Rp_2 - y, \quad (5)$$

где y – деформация контакта (сближение контактирующих поверхностей).

Из уравнений (1) и (3) следует, что наиболее эффективный путь уменьшения утечки – уменьшение межконтактного зазора. Этого можно добиться уменьшением шероховатости и волнистости контактирующих поверхностей. Первое проще, второе сложнее, но, к счастью, наиболее распространенные способы технологической обработки поверхностей таковы, что с уменьшением шероховатости уменьшается и волнистость.

Трение в уплотнениях

Различают несколько видов трения при контакте эластомерных материалов с уплотняемой поверхностью. Поверхностно-адгезионный вид трения обусловлен взаимодействием между полимерными цепями и граничной пленкой твердого тела. В результате непрерывно возникающих и разрушающихся при этом связей возникают механические потери в поверхностном слое резины. Деформационный вид трения обусловлен тем, что при движении резина, копируя микронеровности твердого тела, постоянно деформируется. При этом возникают гистерезисные потери, доля которых в общем трении весьма значительна. Трение резания (абразивное трение) вызвано разрушением поверхности эластомерного материала острыми выступами микронеровностей. Помимо перечисленных видов имеет место жидкостное трение в пленке смазывающей жидкости.

Доля каждого вида трения зависит от микрорельефа уплотняемой поверхности, вязкости жидкости и режима работы агрегата. Так, в режиме граничного трения преобладают адгезионная и гистерезисная составляющие трения, причем со снижением шероховатости поверхности существенно увеличивается адгезионная составляющая. С учетом этого при необходимости обеспечения минимального трения при малых скоростях

движения целесообразно применять уплотнения, изготовленные на основе фторопласта-4, обладающего низкими адгезионными свойствами. В режиме смешанного трения, наиболее характерном для гидроагрегатов, адгезионные и гистерезисные потери уменьшаются, но одновременно возрастают потери, связанные с жидкостным трением. В результате этого при увеличении скорости движения величина общей силы трения существенно уменьшается. В режиме, при котором уплотнение и уплотняемая поверхность полностью разделены пленкой жидкости (жидкостное трение), сила трения пропорциональна вязкости жидкости и скорости движения.

Трение прямо пропорционально рабочему давлению. Чем выше давление, тем больше площадь динамического контакта уплотнения с металлической поверхностью, и тем, соответственно, выше трение. Еще одним фактором, влияющим на трение, является температура. При изменениях температуры механические характеристики материала уплотнения и вязкость рабочей жидкости меняются. При повышении температуры вязкость рабочей жидкости уменьшается, и поэтому при высокой температуре сила трения повышается. Причиной этого является уменьшение масляной пленки между кромкой уплотнения и металлической поверхностью. В результате, уплотнение попадает в положение непосредственного контакта с металлической поверхностью. Таким образом, трение повышается пропорционально шероховатости поверхности.

Упругая деформация уплотнения напрямую зависит от профиля кромки контактирующей с металлическими частями. При недостаточной нагрузке на уплотнение между кромкой и металлической поверхностью возникает чрезмерно толстая масляная пленка, вызывающая утечку рабочей жидкости. При чрезмерной радиальной нагрузке при высоком рабочем давлении слой масляной пленки становится минимальным, что приводит к трению и увеличению температуры трущейся кромки, а в результате быстрому износу уплотнения.

Таким образом, при оптимальном давлении и температуре износ уплотнения получается наименьшим.

Заключение

Существует большое количество видов уплотнительных устройств, но наиболее широкое применение почти во всех отраслях машино и приборостроения получили резиновые уплотнения. Уникальные свойства резины и возможности технологии формования изделий из нее позволили создать многообразные конструкции высокогерметичных, простых, наиболее дешевых и универсальных уплотнений. Самыми универсальными из них являются кольца круглого сечения, широко применяющиеся во всех областях машино и приборостроения и в частности в геофизических приборах. Проблемой является недостаточная изученность вопроса расчета параметров работы узлов с резиновыми кольцами при высоких давлениях – свыше

25 МПа и повышенных температурах, при которых зачастую работают геофизические приборы. Нередки условия работы резиновых уплотнений геофизической аппаратуры при перепаде давления в 140 МПа и температуре 175°C в агрессивных средах (солевые, щелочные или кислотные среды и наличие абразивных включений).

Библиографический список

1. Кондаков, Л.А. Уплотнители и уплотнительная техника: Справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Е. Овандер. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.
2. Померанц, Л.И. Аппаратура и оборудование геофизических методов исследования скважин: Учебник для вузов / Л.И. Померанц, Д.В. Белоконь, В.Ф. Козяр. М.: Недра, 1985. 271 с.
3. Абрамов, Е.И. Элементы гидропривода: Справочник / Е.И. Абрамов, К.А. Колесниченко, В.Т. Маслов. Киев: Техника, 1977. 280 с.
4. Алексеев, В.М. Основы расчета неподвижных соединений на герметичность / В.М. Алексеев // Контактное взаимодействие твердых тел: межвузовский тематический сборник. Калинин: КГУ, 1982. С. 121-130.

УДК 621:681.3

Е.В. Полетаева
Тверской государственный технический университет

БАЗА ЗНАНИЙ КАК ОСНОВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИНТЕГРИРОВАННОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В статье приведены основные требования, предъявляемые к информационным системам, применяемым на машиностроительных предприятиях. Представлена модель базы знаний, её элементная и структурная составляющая. Описывается методика построения системы.

Ключевые слова: база знаний, автоматизированное производство, интеллектуальные системы, информационные системы, онтологический инжиниринг.

KNOWLEDGEBASE AS A FOUNDATION OF AUTOMIZED INTAGRATIVE MACHINE-BUILDING INDUSTRY

In article the information systems principal properties, used in mechanical engineering, are presented. Knowledgebase model is offered. It's element, structure components and construction method are described.

Key words: knowledgebase, automized industry, intellect systems, information systems, ontological engineering,

Современные информационные технологии, разработанные для машиностроительных предприятий, представляют собой специализированные автоматизированные системы, предназначенные для решения как задач проектирования и управления, так и для решения организационных задач. Всё большая интеграция производства, разработка CALS-технологий

требуют создания соответствующей информационной основы для их реализации [1, 3]. В настоящее время эту проблему, как правило, решают за счёт создания информационных систем на базе уже существующих, не изменяя их структуру. Однако при этом возникает целый комплекс проблем.

Во-первых, существующие автоматизированные системы, как правило, своей составной частью имеют базу данных, специально предназначенную для решения задач этой конкретной системы. Задачи же, решаемые на разных этапах производства, определяют конфигурацию и содержание соответствующих баз данных.

Во-вторых, производственные системы, являясь системами сложными, обладают такими свойствами, как уникальность, слабая структурированность, составной характер, разнородность подсистем и элементов, входящих в систему, и др.

В-третьих, производственные системы являются социо-техническими системами, в которых каждый элемент, включая человека, может входить в разные подсистемы, при этом элемент может проявлять разные свойства в зависимости от того, какую роль он играет в конкретной подсистеме.

Для решения всего комплекса проблем актуальной становится разработка технологии, позволяющей объединить уже существующие и вновь создаваемые приложения. Такая технология должна соединять в себе последние достижения как в области алгоритмического программирования, искусственного интеллекта, так и в области машиностроения, для которой и создаётся информационная система.

Основой автоматизированной информационной системы должна стать не база данных, а база знаний рассматриваемой предметной области. База знаний существенно сложнее базы данных, т.к. для знаний характерны следующие особенности:

- внутренняя интерпретируемость (каждая информационная единица должна иметь уникальное имя и однозначно определяться);
- структурированность, т.е. между информационными единицами должны быть установлены отношения (например, «часть-целое», «род-вид» и др); при этом возможна рекурсивность;
- знания образуют некоторое пространство, которое, как правило, является неметрическим.

Модель представления знаний – основной тип моделей искусственного интеллекта. Реализация конкретных систем, основанных на знаниях, происходит в рамках одной из моделей представления знаний или языка представления знаний. Таких моделей немного. Это – логика, фреймы, семантические сети, нейронные сети и др. База знаний такой области, как машиностроение, из-за своей сложности не может быть построена на основе только одной из существующих сегодня моделей: необходима модель, синтезирующая в себе формализмы разных моделей в соответствии со

спецификой рассматриваемой предметной области. Основными задачами, которые необходимо решить при разработке базы, являются:

- выявление элементов как простейших неделимых частей системы;
- выявление подсистем – взаимосвязанных элементов, обладающих свойствами системы;
- построение структуры, отражающей наиболее существенные взаимоотношения между элементами и их группами;
- создание связей, обеспечивающих возникновение и сохранение целостных свойств системы.

Для формального описания (создания онтологии) предметной области машиностроения было проведено исследование и выявлена элементная и структурная составляющая системы [4].

Наши знания фиксируются в разных формах, основной из которых является понятие, обозначаемой знаком-термином. Существует общность в принципах организации знаков. Базу знаний рассматриваемой предметной области можно представить как сочетание различных знаков, каждый из которых выполняет определённую функцию. В предметной области машиностроения основную нагрузку несут характеризующие знаки: иконические – чертежи, эскизы, рисунки, фотографии, схемы и другие документы, содержащие графическую информацию, и символические, составляющие основу базы знаний, – словесные символы.

Основным элементом системы становится термин – языковое выражение, которое называет вещь или группу вещей того или иного рода, реальных или воображаемых, или приложимо к этим вещам. Здесь языковое выражение конституируется ассоциацией словесного символа и фиксированного значения[5].

Множество всех терминов, используемых в области технологии машиностроения, по семантическим признакам можно разделить на три непересекающихся подмножества: вещественных объектов, процессов и свойств. В технологии машиностроения кроме уже упомянутых используются термины, которые не являются собственно терминами рассматриваемой предметной области, а выходят за её рамки, вернее, являются наиболее общими терминами по отношению к терминам предметной области. Такими терминами являются термины «вещественный объект», «процесс», «свойство», «система» и др. Они играют определяющую роль при построении связей между элементами терминологической системы.

Пусть T – терминологическая система области машиностроения; T_v – подсистема вещественных объектов терминологической системы T ; T_p – подсистема процессов терминологической системы T ; T_s – подсистема свойств терминологической системы T .

Основу подсистемы T_v составляет множество терминов вещественных объектов T_v ; подсистемы T_p – множество терминов процессов T_p ; подсистемы T_s – множество терминов свойств T_s .

Термины вещественных объектов определяются через термины вещественных объектов – элементы того же множества: термин t_{vi} ($t_{vi} \in T_v$) определяется через t_{vj} ($t_{vj} \in T_v$). При этом $t_{vi} \neq t_{vj}$. Обозначим связь между термином вещественного объекта t_{vi} , являющимся видом по отношению к термину t_{vj} как $t_{vi} \rightarrow t_{vj}$, а связь между термином вещественного объекта t_{vj} , являющимся родом по отношению к термину t_{vi} , как $t_{vj} \leftarrow t_{vi}$. Каждому термину соответствует объём понятия, т.е. множество предметов, которые характеризуются системой признаков, составляющей содержание понятия. Сингулярному термину соответствует единичное понятие, в объёме которого содержится один элемент.

Между понятиями, имеющими общий род, можно устанавливать отношения по содержанию, чему соответствуют определённые отношения по объёмам [2].

Понятия, находящиеся в отношении противоречия (контрадикторности) по содержанию, чьи объёмы не имеют общих элементов и исчерпывают весь универсум, являются видовыми понятиями одного рода, полученные путём деления понятия по одному основанию. Вследствие этого видовые понятия, имеющие общий род, объединяются в подмножества по признаку: «основание деления». При этом видовые понятия, имеющие одно основание деления, находятся в отношении контрадикторности, и к ним применимы все правила деления.

Понятия, образующиеся в результате деления по разным признакам, логически независимы, т.е. находятся в отношении контрарности по содержаниям (совместимы по истинности, не совместимы по ложности). Их объёмы чаще находятся в отношении перекрещивания, хотя и в редких случаях могут находиться в отношении подчинения.

В результате терминология вещественных объектов (T_v) может быть представлена в виде ориентированного графа, вершинами которого являются элементы множества T_v – термины вещественных объектов, а дугами – родо-видовые связи. Вершины, соответствующие терминам ближайших видов, получающихся в результате деления по одному основанию, помечаются. Аналогично выстраивается терминология процессов (T_p) и терминология свойств (T_s).

Существуют ещё термины-концепты, которые не входят в терминологию предметной области, но являются очень важными объектами, определяющими её структуру. Назовём такое множество терминов – множество терминов концептуальных объектов – T_k , а терминологию, построенную на таком множестве – терминологией концептуальных объектов T_k . Построение терминологии концептуальных объектов аналогично построению трёх рассмотренных выше. Если терминологическую систему предметной области можно назвать её онтологией, то концептуальную терминологию – метаонтологией.

Терминологию предметной области можно представить как систему, основу которой составляет совокупность двух множеств: множества терминов предметной области и множества связей между ними. Основу концептуальной терминологии также составляет совокупность двух множеств: множества концептуальных терминов и связей между ними. Между терминами концептуальной терминологии устанавливаются связи. Термины предметной области наследуют связи концептуальных терминов, видами которых они являются.

Такая модель представления знаний для предметной области может явиться основой при разработке информационных систем, обслуживающих пользователей на различных этапах машиностроительного производства, т.к. позволяет:

- создавать концептуальные формализмы для решения самых разных производственных задач;
- строить алгоритмы решения информационных задач, решая проблемы как анализа, так и синтеза;
- создать информационную основу для интеграции существующих баз данных, баз знаний, различных программных продуктов, уже эффективно используемых на машиностроительных предприятиях.

Библиографический список

1. Горбатов, В.А. Интеллектуальные информационные технологии и стратегии (состояние и перспективы) / В.А. Горбатов. Информационные технологии. М.: Машиностроение, 1995. № 0. С. 35–38.
2. Ивлев, Ю.В. Логика / Ю.В. Ивлев. М.: Наука, 1994. 284 с.
3. Левин, А. CALS-сопровождение жизненного цикла / А. Левин, Е. Судов. Открытые системы. 2001. № 3. С. 58-62.
4. Острейковский В.А. Теория систем / В.А. Острейковский. М.: Высш.шк., 1997. 240 с.
5. Сова, Л.З. Аналитическая лингвистика / Л.З. Сова. М.: Наука, 1970. 256 с.

УДК 621.785.532

Л.М. Нечаев, Н.Б. Фомичева, Е.В. Маркова, Г.В. Сержантова
Тульский государственный университет**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОГЕННОСТИ
ДИФфуЗИОННЫХ ЗОН ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ МИКРОТВЕРДОСТИ**

Рассмотрены два механизма формирования многофазной структуры диффузионных зон. Предложена схема моделирования распределения микротвердости по глубине диффузионных зон. Выполнено моделирование микротвердости диффузионных зон на основе конкретного комплекса их структурных характеристик.

Ключевые слова: диффузионные зоны, структура, гетерогенность, микротвердость, моделирование.

**MODELING OF THE CHARACTERISTICS OF THE DIFFUSION ZONES
HETEROGENEITY IN THE INDICATORS OF MICROHARDNESS**

Two mechanisms of the particulate matter formation in the diffusion zones are examined. A scheme for modeling the distribution of microhardness in the diffusion zones depth was proposed. The simulation of the microhardness of the diffusion zones based on a specific set of structural features was made.

Key words: diffusion zones, structure, heterogeneity, microhardness, modeling.

В результате нитрирования под карбонитридным γ' - или $(\gamma'+\epsilon)$ -слоем формируется диффузионная зона, представляющая собой многофазную структуру, состоящую из азотистого твердого раствора основного металла, его нитридов и карбонитридов, а также химических соединений легирующих элементов.

Распределение и дисперсность упрочняющих нитридных и карбонитридных фаз является многопараметрической функцией и зависит от концентрации нитридообразующих легирующих элементов в сталях (влияет на размер частиц); термодинамического потенциала образования нитридов (влияет на дисперсность частиц); диффузионной подвижности легирующих элементов (влияет на размер частиц). Формирование дисперсных частиц в диффузионных зонах возможно по двум механизмам.

Для случая легирования сталей элементами *Cr*, *Mo*, *Mn*, *W* и др. образование вторых фаз осуществляется при взаимовстречной диффузии азота – углерода и легирующих элементов, не связанных в карбиды [1]. Очевидно, что данный механизм наиболее просто реализуется по различным дефектам кристаллической решетки путем кластерных накоплений. Так как формирование кластеров элементов замещения требует затрат времени, этот вариант упрочнения является длительным.

Второй механизм предусматривает образование нитридов из карбидов основного и легирующих элементов, подчиняющихся в основном стехиометрическому составу MeC (элементы Ti , Zr , Hf и т.д.) [1]. Основным вариант такого механизма: нитрид формируется уже на готовом скоплении легирующего элемента карбида, не требует дополнительной диффузии атомов замещения. Такой механизм может реализоваться в результате прямой реакции азота с карбидом с образованием соответствующего переходного карбонитрида, и, наконец, после полного оттеснения углерода, и нитрида Me_mN_n . Кинетика процесса сводится к постепенному замещению углерода азотом согласно схеме

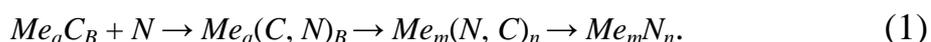


Схема (1) возможна для элементов V , Nb , Zr , Ti и т.д. вследствие однотипности решеток кристаллитов и полной взаимной растворимости соответствующих карбидов и нитридов. Чем выше концентрация легирующих элементов в твердом растворе, тем больше вероятность образования нитридов по твердорастворному механизму.

Многочисленными исследованиями было показано, что определяющие свойства диффузионных зон в значительной степени влияют на работоспособность нитрированных слоев на сталях. Твердость зон внутреннего азотирования зависит от концентрации примесей внедрения в твердом растворе, а также природы и морфологии распределения упрочняющих нитридных и карбонитридных фаз. Высокая твердость и прочность диффузионных зон достигается у сплавов, легированных нитридообразующими элементами. Выделение из твердого раствора дисперсных частиц вторых фаз затрудняет движение дислокаций и пластическую деформацию.

Изменение температуры и продолжительности насыщения позволяет фиксировать в диффузионной зоне различные стадии процесса выделения и, следовательно, разный уровень твердости. Максимальное упрочнение конструкционных сталей достигается в том случае, когда в диффузионной зоне образуются однотипные по азоту предвыделения, полностью когерентные с решеткой твердого раствора. При температуре процесса более 580°C твердость снижается вследствие коагуляции нитридов и нарушения когерентности. Высокая твердость диффузионных зон обязана не только процессам предвыделения и образования нитридов, но и большой растворимостью азота в феррите, легированном переходными металлами. Последнее предопределяет получение высокого уровня искажений, релаксация которых ниже порога рекристаллизации затруднена.

Исследования распределения микротвердости по глубине азотированных слоев в зависимости от температуры и времени обработки показали, что чем выше температура насыщения, тем больше при прочих равных условиях толщина диффузионного слоя и более равномерно падение твердости по его сечению. Повышение степени диссоциации аммиака до 60%

не влияло на характер кривой распределения. Наиболее равномерное падение твердости отмечается в сталях, содержащих повышенное количество хрома и ванадия. Это позволяет, при прочих равных условиях, получать большую эффективную глубину диффузионного слоя.

Весьма важными являются вопросы моделирования микротвердости диффузионных зон на основе конкретного комплекса их структурных характеристик. Можно предложить следующую схему моделирования распределения микротвердости по глубине диффузионных зон:

Этап 1 – определяется или рассчитывается (на основе диффузионных законов в конкретных сталях) распределение концентрации азота по глубине диффузионного слоя при заданном технологическом режиме.

Этап 2 – вычисляется плотность выделившихся дисперсных частиц по глубине упрочненного слоя.

Этап 3 – определяется распределение средних размеров частиц в сечениях карбонитридного слоя.

Этап 4 – рассчитывается распределение прироста предела текучести по толщине диффузионной зоны.

Этап 5 – определяется прирост поверхностной твердости азотированного слоя.

Этап 6 – окончательно вычисляется распределение твердости по глубине диффузионной зоны для заданного технологического режима насыщения.

По этапу 2 расчетной модели количество выделившихся нитридов $N_{\text{ч}}$ в заданном сечении диффузионной зоны принимается в виде линейной функции от концентрации азота

$$N_{\text{ч}} = N_{\text{ч}}^{\text{max}} \cdot \frac{|N| - |N|_y}{|N|_{\text{max}} - |N|_y} \quad (\text{на } 1 \text{ см}^3 \text{ объема}), \quad (2)$$

где $|N|$ – текущая концентрация азота в заданной координате слоя; $|N|_{\text{max}}$ – максимальная растворимость азота в стали; $|N|_y$ – концентрация азота на эффективной границе азотированного слоя. В качестве последней принимается толщина слоя $Y_{\text{д.з}}$, в котором прирост твердости слоя по сравнению с сердцевиной составляет $\Delta H \approx 1000$ МПа

$$Y_{\text{д.з}} = (3,44 \cdot g_c^3 - 1,35 \cdot g_c^2 - 6,04 \cdot g_c - 0,33) \cdot \sqrt{D \cdot \tau}, \quad (3)$$

где g_c – приведенная свободная энергия процесса нитридообразования; D – коэффициент диффузии азота в α -фазе; τ – продолжительность процесса.

Для каждого легирующего элемента величина $N_{\text{ч}}^{\text{max}}$ определяется по формуле

$$N_{\text{ч}}^{\text{max}} = \frac{C_0}{M} \cdot A \cdot 10^{\frac{\beta}{T}}, \quad (4)$$

где C_0 – концентрация легирующего элемента в твердом растворе (% , ат); M – молекулярная масса элемента; T – температура процесса; A и β – кон-

станты для каждого из легирующих элементов. Расстояние между центрами дисперсных частиц нитридов рассчитываются согласно выражению

$$d = \frac{1}{\sqrt[3]{N_q^{\max}}} . \quad (5)$$

По этапу 3 расчетной модели определяется радиус выделившихся частиц, соответствующий заданным технологическим режимам насыщения и химическому составу сталей

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{D^*}{\tau} \cdot \frac{C_0 - C_e}{C - C_e} - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot D^* \cdot r^3 \cdot N_q^{\max} , \quad (6)$$

где C и C_0 – исходная концентрация легирующего элемента в твердом растворе и в нитриде соответственно; C_e – концентрация азота на границе выделения – твердый раствор. В качестве эффективного коэффициента диффузии легирующих элементов D^* принимается так называемое значение средневзвешенного коэффициента по атомной доле в соответствии с химическим составом стали.

По этапу 4 прирост предела текучести в зоне внутреннего азотирования $\Delta\sigma_T$ легированных сталей определяется как сумма эффектов упрочнения дисперсными частицами $\Delta\sigma_{д.ч}$ и твердорастворного упрочнения $\Delta\sigma_{т.р}$

$$\Delta\sigma_T = \Delta\sigma_{т.р} + \Delta\sigma_{д.ч} = 467 \cdot C_N + \frac{22470}{d - D} \cdot \lg \frac{d - D}{5} . \quad (7)$$

Зная распределение азота по глубине диффузионной зоны C_N и геометрические параметры выделившихся нитридных частиц (d и D), возможно рассчитать изменение прочности по толщине карбонитридного слоя.

По этапу 5 при расчете микротвердости поверхности, или, что то же самое, карбонитридного слоя, установлена ее зависимость от некоторого безразмерного комплекса g_c , нормируемого свободной энергией образования нитридов основы и легирующих элементов ΔG_0

$$g_c = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta G_0}{RT} = \sum_{i=1}^m \frac{N_i}{X_i} \cdot g_i , \quad (8)$$

где n_i – молярная доля i -го легирующего элемента из m элементов, легирующих конкретный сплав; X_i – стехиометрический коэффициент. Молярная доля N_i , связана с концентрацией i -го элемента C_i по формуле

$$N_i = \frac{C}{100 \cdot \sum_j C_j \cdot (M_{Fe} / M_i)} , \quad (9)$$

где M – молекулярная масса. В соответствии с известной зависимостью $\Delta G_0 = a + bT$ комплексный параметр g_j может быть представлен в виде дву-члена

$$g_i = a_i + \frac{B_i}{T}. \quad (10)$$

Используя известные значения коэффициентов a и B для основных типов нитридов хрома, молибдена, железа, ванадия, вольфрама и т.п., можно определить поверхностную микротвердость карбонитридного слоя.

По этапу 6 распределение твердости по глубине диффузионного слоя $(HV)_y$ рассчитывается исходя из прироста предела текучести на поверхности $(\Delta\sigma_T)_{yn}$ и на заданной глубине зоны внутреннего азотирования $(\Delta\sigma_T)_y$ по следующим зависимостям

$$(\Delta HV)_y = \Delta HV_{II} \cdot \frac{(\Delta\sigma_T)_y}{(\Delta\sigma_T)_{yII}} \quad (11)$$

$$HV_y = HV_0 + (\Delta HV)_y, \quad (12)$$

где HV_0 – твердость сердцевины; $(\Delta HV)_{II}$ – изменение твердости на поверхности.

Проведенные с использованием уравнений (2) – (12) оценки соответствия описанной модели твердости экспериментальным результатам показали достаточно хорошую ее точность. В то же время, следует заметить, что для сложнолегированных сталей, к которым относятся и рассматриваемые, модельные расчеты должны быть несравненно более сложными и, соответственно, менее точными.

Однако, с практических позиций важность данного подхода состоит в другом. А именно, доказывается существование количественной связи между микротвердостью диффузионных зон и характеристиками их структурной гетерогенности. Это предполагает возможность постановки обратной задачи – по измеренным распределениям микротвердости оценивать структуру диффузионных зон с целью разработки моделей и критериев оценки эксплуатационных свойств и, в том числе, контактную выносливость и усталостную прочность.

Библиографический список

1. Власов, В.М. Работоспособность высокопрочных термодиффузионных покрытий в узлах трения машин / В.М. Власов, Л.М. Нечаев. Тула: Приокск. кн. изд-во, 1994. 235 с.
2. Нечаев, Л.М. Определение параметров трещиностойкости нитрированных сталей / Л.М. Нечаев, Н.Б. Фомичева, И.С. Иванькин // Современные наукоемкие технологии. 2007. № 5. С. 89–92.

УДК 669.017

Д.А. Барчуков
Тверской государственной технической университет

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА КОРПУСА И РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИИ С ПОМОЩЬЮ НАПЛАВКИ И ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Описано влияние химического состава сталей, применяемых при изготовлении составного режущего инструмента, на механические и эксплуатационные свойства этих сталей. Указанное влияние описано с учетом особенностей технологии изготовления инструмента. В технологии изготовления реализован способ упрочнения быстрорежущих сталей за счет применения наплавки, поверхностного пластического деформирования и последующего высокотемпературного отпуска. На основании предложенной технологии изготовления инструмента рекомендованы марки конструкционной и быстрорежущей сталей для изготовления резьбового резца.

Ключевые слова: наплавка, поверхностное пластическое деформирование, быстрорежущая сталь, микроструктура.

SUBSTANTIATION OF THE CHOICE OF THE MATERIAL OF CASE AND CUTTING PART OF A TOOL AT ITS MANUFACTURING BY MEANS OF A WELDUP AND SURFACE PLASTIC DEFORMATION

The influence of a chemical composition of the steel for compound cutting tools on mechanical and operational properties of this steel is described. The above mentioned influence is described taking into account the features of manufacturing techniques of a tool. The method of hardening of high speed steel by a welding, surface plastic deformation and the subsequent high-temperature tempering is realized in the manufacturing technique. The grades of constructional and high speed steels for manufacturing of a thread-cutting tools are recommended according to the offered manufacturing techniques of the tools.

Key words: welding, surface plastic deformation, high speed steel, microstructure.

Быстрорежущие стали широко применяются для изготовления инструмента различного назначения, их доля составляет около 2/3 мирового объема производства инструментальных материалов.

Повышение механических и эксплуатационных свойств режущего инструмента при одновременном сокращении расхода быстрорежущей стали являются актуальной проблемой мирового уровня.

Одним из эффективных направлений при решении данной проблемы является возможность применения способа упрочнения быстрорежущих сталей за счет совершенствования их структурного состояния наплавкой, поверхностным пластическим деформированием (ППД). Совершенствование структурного состояния заключается:

- в получении в результате наплавки наплавленного металла в закаленном состоянии с очень мелким зерном, высоколегированным твердым

раствором и благоприятным распределением мелкодисперсных первичных карбидов;

- в ППД наплавленной быстрорежущей стали в процессе наплавки на стадии охлаждения в температурном интервале мартенситного превращения с целью снижения до минимума содержания остаточного аустенита, а также осуществления поверхностного упрочнения наплавленного металла за счет явления наклепа;

- в последующем выполнении высокотемпературного отпуска с параметрами режима, обеспечивающими сохранение высоколегированного мартенсита и дополнительное упрочнение наплавленного металла.

Для реализации вышеописанного способа упрочнения при изготовлении составного режущего инструмента важным элементом технологии изготовления является обоснование выбора материала корпуса и режущей части инструмента.

Выбор материала корпуса инструмента определяется следующими факторами:

- корпус инструмента в процессе наплавки подвергается температурным деформациям;

- в процессе упрочнения ударным ППД корпус резца испытывает большие механические нагрузки;

- корпус после наплавки на него материала режущей части подвергается однократному высокотемпературному отпуску.

Корпус резьбового резца должен иметь достаточную твердость ($HRC\ 38...43$) и прочность вследствие испытываемых изгибающих и сжимающих напряжений в процессе наплавки и упрочнения.

В качестве основного металла чаще выбирают среднеуглеродистые и среднеуглеродистые низколегированные качественные конструкционные стали 40, 45, 40Х, 38ХС, 30ХГСА, 35ХГС и др. В состоянии поставки эти стали имеют достаточно низкие значения предела прочности σ_b и предела текучести σ_t и могут ограниченно применяться при изготовлении наплавленного инструмента. При изготовлении наплавленных токарных прорезных, отрезных, автоматных пластинчатых резцов их применение в состоянии поставки не представляется возможным.

Максимальные значения σ_b и σ_t стали приобретают после закалки и низкого отпуска [1], и, хотя они не достигают значений, характерных для быстрорежущих сталей после упрочняющей термической обработки, альтернативы им при изготовлении наплавленного инструмента практически не существует.

Главным критерием выбора материала корпуса являются механические свойства стали после термической обработки. Резец после наплавки подвергается однократному отпуску при $t = 540\ ^\circ\text{C}$ в течение 40 минут. Стали, которые могут быть использованы в качестве основного материала для наплавки на них быстрорежущей стали, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Механические свойства сталей после термообработки.
Закалка 880°C в масло + отпуск 540°C (ОСТ 1050-88, 19282-73, 10702-78, 4543-71)

Марка стали	Предел текучести σ_T , МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость a , Дж/см ²	Твердость по Бринеллю HB
Сталь 45	520...640	750...820	16...14	62...65	160...120	200...220
09Г2С	490	365	19	-	64	145
30ХГСА	800	950	14	58	-	319...336
25Х1МФ	590	735	13	40	49	235...277

На основе эти данных для изготовления корпуса рекомендуется сталь 30ХГСА (ГОСТ 10702-78).

В настоящее время отечественная промышленность использует достаточно большое количество марок быстрорежущих сталей для высокопроизводительной обработки резанием. Поэтому необходимо дифференцированно подходить при назначении их для конкретного инструмента.

Основные свойства быстрорежущей стали оказывают значительное влияние на работу режущего инструмента. Так, например, теплостойкость быстрорежущей стали определяет допустимые скорости резания, а высокая вторичная твердость и износостойкость – возможность обработки труднообрабатываемых материалов. Благодаря высокому пределу прочности при изгибе и ударной вязкости можно вести механическую обработку с большими сечениями среза и ударными нагрузками. Высокая абразивная износостойкость позволяет изготавливать метчики, фасонные резцы, дисковые фрезы с малыми задними углами; хорошая шлифуемость быстрорежущей стали особенно важна при изготовлении инструмента сложных профилей. Малая карбидная неоднородность повышает качество инструмента, особенно крупногабаритного.

Различают быстрорежущие стали нормальной, повышенной и высокой теплостойкости.

За нормальную принимается теплостойкость широко распространенной быстрорежущей стали Р18. Она сохраняет твердость не менее HRC 60 при нагреве до 615–620°C. Увеличение теплостойкости до 640–650°C позволяет повысить стойкость инструмента в 2–3 раза, а при увеличении теплостойкости до 700–725°C стойкость инструмента возрастает в 10–15 раз [2].

В сталях нормальной теплостойкости дисперсионное твердение вызывается выделением карбидов вольфрама, молибдена и в небольшом количестве ванадия. Для получения необходимых свойств быстрорежущие стали должны содержать 9–18% W, 6–9% Mo при 1,0–2,5% V. Стали такого типа (Р18, Р12, Р9, Р6М3, Р6М5, Р9М4 и многие другие марки) используют наиболее широко: их производство составляет 80–90% общего производства быстрорежущих сталей.

В сталях повышенной теплостойкости выделяется больше карбида ванадия, более устойчивого против коагуляции. В сталях, легированных кобальтом, выделяется, кроме того, интерметаллид. Такие стали (P18Ф2, P9Ф5, P18Ф2К5, P9К10, P10Ф5К5 и другие марки) сохраняют твердость *HRC* 60 до температуры 650°С.

Стали высокой теплостойкости характеризуются пониженным содержанием углерода, но весьма большим количеством легирующих элементов – В11М7К23, В14М7К25, 3В20К20Х4Ф. Они имеют твердость 69–70 *HRC* и теплостойкость 700–725°С. Такая теплостойкость характерна для сплавов, у которых при дисперсионном твердении выделяются интерметаллиды. Теплостойкость быстрорежущих сталей (как и жаропрочных) возрастает с усложнением состава стали, когда она легируется не одним, а несколькими элементами. Это приводит к выделению при дисперсионном твердении карбидов более сложного состава и образованию легированного феррита, что увеличивает их стойкость при нагреве [2].

Однако деление быстрорежущих сталей на группы с умеренной, повышенной и высокой теплостойкости (производительности) является достаточно условным. Нельзя рекомендовать использование быстрорежущей стали повышенной производительности главным образом для обработки труднообрабатываемых и жаропрочных материалов или для работы на повышенных скоростях без учета конкретного вида инструмента.

Инструмент из стали повышенной производительности с высоким содержанием кобальта и ванадия, например, наиболее эффективен при работе на повышенных скоростях на новом и жестком оборудовании. При режимах резания, характерных для сталей умеренной производительности (типа P18), стойкость инструмента из высоколегированных быстрорежущих сталей повышается незначительно, а в некоторых случаях (при прерывистом резании или изношенном оборудовании) она из-за повышенной хрупкости может быть даже ниже стойкости инструмента из стали P18 или P6M5.

При выборе марки стали необходимо учитывать ее основные физико-механические свойства. Например, ударная вязкость сталей P9К10 и P10Ф5К5 в 2–3 раза меньше, чем ударная вязкость стали P18. Это не позволяет рекомендовать их при ударном характере нагружения инструмента. Применение сталей P9К10 и P9М4К8 для червячных фрез эффективно только при условии высоких точности и жесткости зубофрезерных станков. Сталь P6M5 имеет на 30–50% более высокую ударную вязкость, чем сталь P18, а также значительно меньшую карбидную неоднородность, поэтому эта марка стали является наиболее целесообразной для инструментов, отличающихся пониженной прочностью (например, для метчиков и сверл) или работающих на станках с недостаточно жесткой системой СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь) [3].

Перспективным способом получения быстрорежущих сталей является метод порошковой металлургии. Главной отличительной особенностью

порошковых сталей является равномерное распределение карбидов по сечению, которое не превышает первого балла шкалы карбидной неоднородности (ГОСТ 19265-73). В определенных условиях, как показывают эксперименты, стойкость режущих инструментов из порошковых сталей в 1,2–2,0 раза выше стойкости инструментов, изготовленных из сталей обычного производства. Наиболее рационально порошковые стали использовать при обработке труднообрабатываемых сложнолегированных материалов и материалов, имеющих повышенную твердость ($HRC > 32$), а также для изготовления крупногабаритных инструментов диаметром более 80 мм.

Проводятся работы по созданию и уточнению области целесообразного применения быстрорежущих сплавов дисперсионного твердения типа P18M7K25, P18M3K25, P10M5K25, которые представляют собой железкобальтовые вольфрамовые сплавы. В зависимости от марки они содержат: W 10...19%, Co 20...26%, Mo 3...7%, V 0,45...0,55%, Ti 0,15...0,3%, C до 0,06%, Mn не более 0,23%, Si не более 0,28%, остальное железо. В отличие от быстрорежущих сталей, рассматриваемые сплавы упрочняются вследствие выделения при отпуске интерметаллидов, имеют более высокую теплостойкость (700–720°C) и твердость (68–69 HRC). Высокая теплостойкость у них сочетается с удовлетворительной прочностью, что обуславливает повышенные режущие свойства сплавов. Эти сплавы дорогостоящие, и применение их целесообразно лишь при резании труднообрабатываемых материалов [4].

Способ упрочнения быстрорежущей стали реализовали в технологии изготовления резьбового резца для нарезания трапецеидальной резьбы. Упрочняли переднюю поверхность режущей части резца. В качестве материала режущей части выбрана марка быстрорежущей стали, сходная по химическому составу к стали P2M8. Химический анализ состава наплавленного металла проведен на оптико-эмиссионном спектрометре *FOUND-RY-MASTER* с компьютерной обработкой результатов, представленных в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав наплавленного металла

Хим. элемент	<i>Fe</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Nb</i>	<i>V</i>	<i>W</i>	<i>S</i>
Содержание, %	83,8	0,7	0,4	0,63	4,3	5,8	0,11	0,1	0,1	>1	0,8	1,77	0,01

Замена вольфрама молибденом в соотношении 1:1,5 позволяет уменьшить себестоимость быстрорежущей стали ввиду высокой стоимости вольфрама. Также, снижение содержания вольфрама обеспечивает снижение карбидной неоднородности. Снижение значений теплостойкости данной марки стали частично компенсируется более высоким значением теплопроводности, которым обладает молибден в сравнении с вольфрамом.

Применение стали со сниженным содержанием вольфрама допустимо при изготовлении инструмента работающего на щадящих режимах, т.е. не

приводящих к нагреву в зоне резания до температур, превышающих теплостойкость материала режущей части. Именно в таких условиях работают резбовые резцы для нарезания трапецеидальной резьбы.

Библиографический список

1. Справочник по конструкционным материалам: Справочник / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов [и др.]; Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 640 с.
2. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. М.: Metallurgy, 1983. 527 с.
3. Безъязычный, В.Ф. Расчет режимов резания: Учебно-методическое пособие / В.Ф. Безъязычный, И.Н. Аверьянов, А.В. Кордюков, Р.Н. Фоменко, А.Н. Сулягин. М.: Машиностроение, 2010. 270 с.
4. Геллер, Ю.А. Современные быстрорежущие стали / Ю.А. Геллер // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. 1977. № 10. С. 36–41.

УДК 621.793.1

М.Ш. Мигранов

Уфимский государственный авиационный технический университет

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНСТРУМЕНТА С МНОГОСЛОЙНЫМ ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния на износостойкость режущего инструмента с многослойными покрытиями химического состава и кристаллохимического строения покрытия и технологии его получения. Лучшие эксплуатационные свойства показали многослойные титано-алюминиевые покрытия $(TiAl)N$, $(AlTi)N$, $(AlTiCr)N$.

Ключевые слова: многослойные покрытия, режущий инструмент, износостойкость.

THE EFFICIENCY OF A METAL CUTTING BY THE USE OF A CUTTING TOOL WITH MULTILAYER ANTIWEAR COATING

The influence of a coating chemical composition, its crystal structure and fabrication method on wear resistance of a cutting tool with multilayer coating has been investigated experimentally. The best running properties show the multilayer titanium aluminum coatings $(TiAl)N$, $(AlTi)N$, $(AlTiCr)N$.

Key words: multilayer coatings, cutting tool, wear resistance.

Использование современного высокопроизводительного и дорогостоящего металлорежущего оборудования, оснащенного системами числового программного и адаптивного управления, особенно в условиях гибких автоматизированных производств и мехатронных станочных систем, повышает требования, предъявляемые к качеству, надежности режущего инструмента, ужесточает условия его работы. Режущие инструменты работают в условиях воздействия сложного комплекса факторов, например,

высоких контактных напряжений и температур, а также в условиях активного протекания физико-химических процессов. При этом контактные площадки инструмента интенсивно изнашиваются в условиях абразивного воздействия инструментального материала, адгезионно-усталостных, коррозионно-окислительных и диффузионных явлений [1, 2]. Работоспособность инструмента может быть повышена за счет такого изменения поверхностных свойств, при котором контактные площадки режущего клина будут наиболее эффективно сопротивляться указанным видам изнашивания как при комнатной, так и при повышенной температурах. При этом инструментальный материал должен одновременно обладать достаточным запасом прочности при сжатии и изгибе, приложении ударных импульсов и знакопеременных напряжений. Перечисленные свойства обычно являются взаимоисключающими, и создание режущего инструмента с идеальным комплексом указанных свойств в объеме однородного тела практически не представляется возможным. Поэтому в настоящее время очень большое внимание уделяется многокомпонентным и многослойным покрытиям. Широкое промышленное использование режущих инструментов с износостойкими покрытиями позволяет решать целый комплекс задач, таких, как значительное повышение стойкости и надежности инструмента; сокращение удельного расхода дорогостоящих инструментальных материалов и остродефицитных элементов (вольфрам, молибден, тантал, кобальт и т.д.) для их изготовления; расширение эффективной области использования твердых сплавов и сокращение номенклатуры применяемых сплавов стандартных марок; увеличение качества поверхностного слоя и точности размеров обработанных деталей; улучшение обрабатываемости сложнолегированных сталей и сплавов, используемые в узлах деталей силовой части газотурбинных двигателей (ГТД) и летательного аппарата (ЛА); увеличение производительности механической обработки деталей, где более 70% занимает лезвийная обработка резанием.

Направленное изменение свойств покрытий путем изменения их состава, структуры и строения позволяет существенно изменять контактные характеристики процесса резания. Известно [2-4], что химический состав, физико-механические и теплофизические свойства покрытий могут значительно отличаться от соответствующих свойств инструментального и обрабатываемого материалов, и, как следствие, многослойное покрытие следует рассматривать как своеобразную «третью среду». Причем эта среда, с одной стороны, может заметно изменять поверхностные свойства инструментального материала, с другой – влиять на контактные процессы, деформацию, температуру и усилия резания, направленность тепловых потоков, термодинамическое напряженное состояние режущей части инструмента, проявляя эффект каждого из слоев покрытия.

Процесс трения на контактных площадках передней и задней поверхностей во многом определяется поверхностными свойствами пары трения

инструмент-деталь. Внешнее трение, согласно молекулярно-механической теории, имеет двойственную природу, обусловленную объемным деформированием материала и преодолением межмолекулярных связей, возникающих между участками трущихся поверхностей. Адгезионное взаимодействие (схватывание) при трении и, особенно, при резании намного выше, чем в случае статического сжатия одинаковым нормальным давлением. Установлено, что касательные напряжения резко инициируют схватывание. Схватывание можно рассматривать как цепной процесс, начинающийся с образования активных центров, их взаимодействия и заканчивающийся образованием общих металлических связей двух контактирующих тел с дальнейшим их разрывом. С учетом идентичности законов трения и адгезии, согласно [3], наиболее простым и надежным способом оценки склонности к схватыванию инструментального и обрабатываемого материалов являются такие параметры, как прочность адгезионных связей на срез, адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения и т.д.

Нанесение покрытий на инструментальные материалы позволяют значительно снизить силу трения, особенно для наиболее термодинамически устойчивых покрытий в виде окислов некоторых металлов, а также для покрытий, склонных к диссоциации при температурах, соответствующих максимальным температурам резания. С повышением температуры увеличивается частота собственных колебаний валентных атомов, растет пластичность материала и снижается его сопротивляемость пластическому деформированию. Таким образом, даже при постоянном нормальном напряжении увеличиваются количество активных центров и площадь фактического контакта. Кроме того, рост температуры способствует разрушению поверхностных пленок и образованию химически чистых «ювенильных» поверхностей. Последнее является необходимым условием для проявления схватывания. Это приводит к росту трения с увеличением температуры. Однако в результате дальнейшего увеличения температуры происходит как разупрочнение узлов схватывания, так и сильное окисление трущихся поверхностей. Эти обстоятельства приводят к снижению силы трения при дальнейшем повышении температуры [5].

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей влияния на износостойкость инструментального материала с многослойными покрытиями, во-первых, их химического состава и кристаллохимического строения, во-вторых, технологии получения этих покрытий, в-третьих, изменения элементов режима резания при лезвийной обработке различных материалов в широком диапазоне.

Проведены триботехнические исследования на адгезиомере [6] при использовании сферических инденторов из быстрорежущей стали Р6М5 без покрытия, с покрытиями $(TiCr)N$ и $(TiCr)N + \text{эпилама}$ – материал образцов из стали 40Х (20 HRC), а также серии натурных испытаний при фрезеровании и точении. Фрезерование осуществлялось на вертикально-фрезерном

станке *HECKERT* сталей и сплавов 40X, 12X18H10T, ЭИ-654, ЭИ-698ВД концевыми фрезами ($d = 12$ мм, $z = 4$) марки *Carbide* (США) – твердый сплав на основе карбидов вольфрама; *Carbide* + покрытие $(TiAl)N$; *HSS* + покрытие $(TiCr)N$ (Россия) – быстрорежущая карбидосталь; М42 (Япония) – быстрорежущая сталь с содержанием 8% *Co*; М42 + покрытие $(TiAl)N$ и резцовыми фрезами ($d = 90$ мм, $z = 1$) со сменными четырехгранными твердосплавными пластинами ТТ8К6 и ТТ8К6 + покрытия TiN , $(TiCr)N$, $(TiAl)N$, $(AlTi)N$, $(TiAlCr)N$, $(AlTiCr)N$ с различным процентным содержанием каждого из элементов покрытия, при различных режимах резания ($n = 500–900$ об/мин, $S = 60–100$ мм/мин, $t = 1–3$ мм, $b = 4–10$ мм). Причем эти покрытия нанесены как различными фирмами (Бальцерс, *Caromant*, *Carbide*, МКТС и другие), так и различными методами, в частности, после предварительного отжига импульсами как основы, так и самого покрытия; с отдельных катодов; от сплавного катода. Точение производилось на токарном станке 16К20 сталей и сплавов 40X, ЭИ-654, ЖС6УВИ твердосплавными пластинами ТТ8К6 со всеми вышеперечисленными покрытиями.

При фрезеровании и точении исследовались такие эксплуатационные свойства режущего инструмента и самого процесса, как износ инструмента по задней поверхности (рис. 1), относительный линейный износ, температура и усилия резания, коэффициент усадки стружки, а также период стойкости (рис. 2) и показатели качества обработанной поверхности.

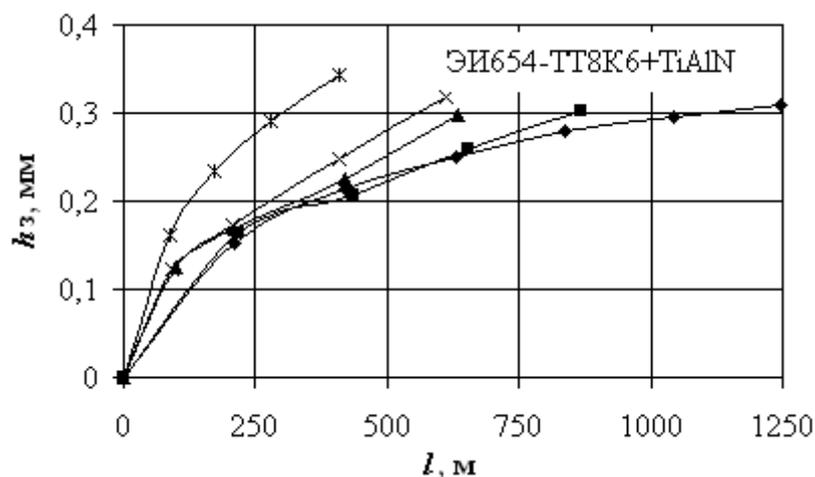


Рис. 1. Влияние длины пути резания на износ инструмента по задней поверхности при точении с различными скоростями резания:

◆ — 58 м/мин; ■ — 80 м/мин; ▲ — 91 м/мин; ✕ — 108 м/мин; ✱ — 150 м/мин

По результатам этих исследований можно сделать следующие выводы:

– применение покрытия и эпилама существенно снижает прочность на срез адгезионных связей практически во всем исследованном диапазоне температур контакта;

– износостойкость концевых фрез в зоне низких скоростей резания в значительной мере определяет наличие хорошего покрытия. Титано-

алюминиевые покрытия по сравнению с другими показали более высокую износостойкость - примерно на 30–45% при высоких режимах резания;

– износостойкость твердосплавных пластин с покрытиями при точении в сравнении с основой в исследуемом диапазоне режимов обработки отличалась в среднем на 15–25 % в лучшую сторону (рис. 2 и 3).

Лучшие показатели эксплуатационных свойств многослойных покрытий характерны для $(TiAl)_N$, $(AlTi)_N$, $(AlTiCr)_N$. Видимо, это объясняется тем, что эти многослойные покрытия оказывают влияние на перераспределение теплового потока в зоне контакта и износостойкость режущего инструмента в зоне приработочного износа.

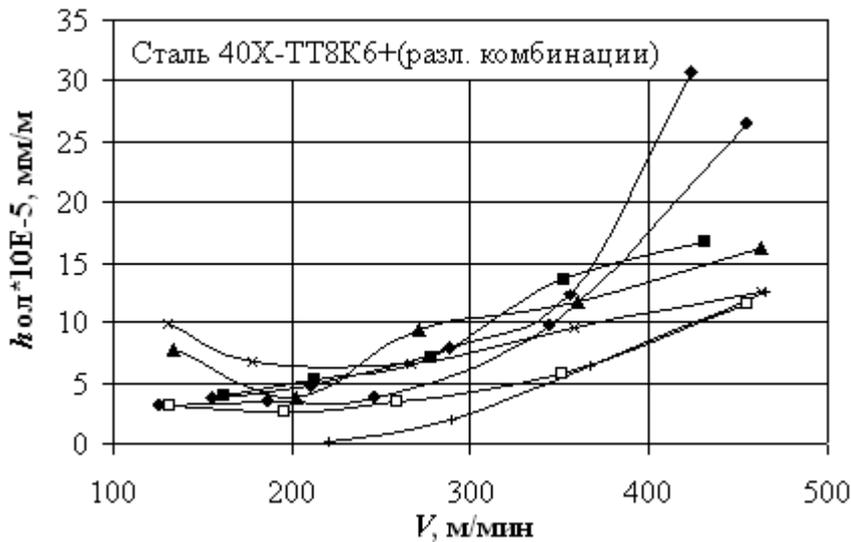


Рис. 2. Влияние скорости резания на относительный линейный износ инструмента при точении с различными покрытиями: —◆— ТТ8К6 без марк.; —■— ТТ8К6 с марк.; —▲— TiN; —×— TiCrN; —□— TiAlN; —◆— AlTiN; —+— Бальцерс

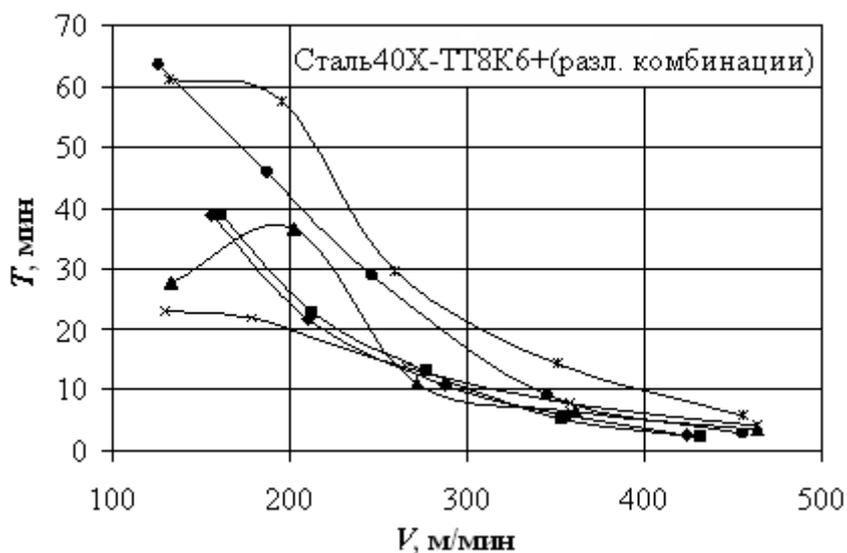


Рис. 3. Влияние скорости резания на период стойкости инструмента с различными покрытиями: —◆— ТТ8К6 без марк.; —■— ТТ8К6 с марк.; —▲— TiN; —×— TiCrN; —□— TiAlN; —◆— AlTiN

Библиографический список

1. Андреев, А.А. Прогрессивные технологические процессы в инструментальном производстве / А.А. Андреев, А.Г. Гаврилов, В.Г. Падалко. М.: Машиностроение, 1981. 214 с.
2. Верещака, А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
3. Лоладзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.
4. Старков, В.К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ / В.К. Старков. М.: Машиностроение, 1984. 120 с.
5. Шустер, Л.Ш. Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке / Л.Ш. Шустер, Н.К. Криони, В.Ю. Шолом, М.Ш. Мигранов. М.: Машиностроение, 2008. 318 с.
6. Патент на полезную модель № 34249. Прибор для исследования адгезионного взаимодействия / Л.Ш. Шустер, М.Ш. Мигранов; опубл. 24.06.2003.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	
В.В. Измайлов, Д.А. Левыкин ЖЕСТКОСТЬ КОНТАКТА И ЕГО ФРЕТТИНГСТОЙКОСТЬ	4
С.Г. Докшанин ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ СЛУЧАЯ КАЧЕНИЯ ТЕЛ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ	10
М.М. Матлин, А.И. Мозгунова, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СООТНОШЕНИЯ ТВЕРДОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ НА КОНТАКТНУЮ ЖЁСТКОСТЬ	14
Р.А. Секретарев МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	18
Г.Б. Бурдо, М.В. Васильев РАЗВИТИЕ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ТВЁРДОСМАЗОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ	24
ТРИБОТЕХНИКА	
Г.Ф. Зюзина, О.Т. Чижевский, А.П. Краснов, Б.Ф. Зюзин, Н.А. Лобачев РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТРИБОУСТОЙЧИВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА СВЕРХВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ	28
В.В. Измайлов, М.В. Новоселова ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С УЧЕТОМ СУБШЕРОХОВАТОСТИ	36
О.В. Сутягин ПРИМЕНЕНИЕ ТВЁРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В МЕХАНИЗМАХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ	42
О.В. Сутягин ТРЕНИЕ МОДЕЛИ ЕДИНИЧНОЙ НЕРОВНОСТИ ПРИ УСЛОВИИ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА	50
И.И. Беркович, Ю.И. Морозова ФРИКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТА ВОЛОКОН, ТКАНЫХ И СПЛОШНЫХ ЛЕНТ	57

М.Ш. Мигранов ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТОЧЕНИИ	63
А.М. Мигранов, М.Ш. Мигранов ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ СОЖ НА ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	66
А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, М.В. Мардян КОМПЛЕКТ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОДИСПЕРСНЫХ МАГНИТНЫХ СРЕД. Часть 1	68
И.А. Барабонова, Н.С. Зубков, М.В. Новоселова, Л.Е. Афанасьева ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ	74
Ф.Веселка, В.Н. Забоин ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ЭЛЕКТРОЩЕТОК МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ	79
<i>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН</i>	
А.П. Архаров, К.С. Любимов ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПАЗА ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ОТВЕРСТИЯ	86
И.В. Горлов, А.Н. Болотов, Д.И. Горлов ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ МАШИН	89
А.В. Кондратьев, С.М. Кочканян, С.П. Смородов, В.А. Русинкевич ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРОХОЧЕНИЯ ГРАВИЯ НА ВАЛКОВЫХ СОРТИРОВКАХ	96
Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх, В.Г. Бурдо, С.Р. Испирян АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	100
Г.Б. Бурдо, А.А. Исаев, В.Г. Бурдо, Н.В. Испирян АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА В МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	106
В.Ю. Анцев, П.В. Витчук, Е.А. Плахова ВЗАИМОСВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССАЖИРОПОТОКА ЗДАНИЯ И ИЗНОСА ЛИФТОВЫХ КАНАТОВЕДУЩИХ ШКИВОВ	110
С.А. Чаплыгин КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ	114
Е.В. Полетаева БАЗА ЗНАНИЙ КАК ОСНОВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИНТЕГРИРОВАННОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	124

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л.М. Нечаев, Н.Б. Фомичева, Е.В. Маркова, Г.В. Сержантова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОГЕННОСТИ ДИФФУЗИОННЫХ ЗОН ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ МИКРОТВЕРДОСТИ 129

Д.А. Барчуков**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА КОРПУСА И РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИИ С ПОМОЩЬЮ НАПЛАВКИ И ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ** 134

М.Ш. Мигранов**ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНСТРУМЕНТА С МНОГОСЛОЙНЫМ ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ** 139

**МЕХАНИКА И ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ
НА ПОВЕРХНОСТИ И В КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ,
ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

Межвузовский сборник научных трудов
Выпуск 6

Сборник издается в авторской редакции
Ответственный редактор В.В. Измайлов
Технический редактор А.Ю. Соколова

Подписано в печать 15.01.13

Формат 60×84/16

Физ. печ. л. 9,25

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 8,6

Заказ № 3

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 8,05

С – 3

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22