ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

2018 Том 19 / **1 (210)**

СОДЕРЖАНИЕ

Сборочное оборудование и его элементы

Житников Ю.З., Пискунов В.В. Самодоориентация деталей, сопрягаемых по резьбовым поверхностям при роботизированной сборке 3

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Микаева С.А., Бойчук М.И. Сборка и устройство каплеотбойника 7

Минаев А.Я., Коровкин Ю.В. Изучение динамических свойств магнитоактивных эластомеров и разработка демпфирующих опор 10

Тептиков Н.Р., Резниченко А.А., Губарев П.В., Глазунов Д.В. Математические методы принятия решений в системах диагностики и управления на тяговом подвижном составе 13

Трение и смазка в машинах и механизмах

Панин С.В., Корниенко Л.А., Алексенко В.О., Буслович Д.Г., Донцов Ю.В. Экструдируемые полимер-полимерные композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) 16

Бородин А.В. Усовершенствование буксы грузового вагона с цилиндрическим роликоподшипником 24

Майба И.А., Глазунов Д.В. Способы регулирования коэффициента сцепления в контакте "колесо—рельс" 27

Мигранов М.Ш., Фукс-Рабинович Г.С., Шустер Л.Ш., Мигранов А.М. Износостойкость порошковых инструментальных материалов 32

Эрлих Б.М. Методика изменения состояния гармонических колебаний 39

В помощь конструктору, технологу

Можегова Ю.Н., Марихов И.Н. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования пневмоцилиндров в САПР КОМПАС-3D 44

Информация

Указатель статей, опубликованных в 2017 году 46

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" — **84967**) или непосредственно в издательстве

Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

E-mail: sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

Председатель редакционного совета

В.И. КОЛЕСНИКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф.
В.В. БАРДУШКИН, д.ф.-м.н.
И.А. БУЯНОВСКИЙ, д.т.н., проф.
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф.
А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф.
С.М. ЗАХАРОВ, д.т.н.
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.
Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.
А.В. ИГНАТОВ, к.т.н., доц.
Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н.
А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.
И.А. ЛЮБИНИН, к.т.н.
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.
А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД
Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК
Ю.Н. КУЛЬЧИН, акад. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

ВОЛГОГРАД
М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.
В.И. ЛЫСАК, акад. РАН
В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

ИЖЕВСК
И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.
В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.
Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.

КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ
Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ
С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н.
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ, к.т.н.

НИЖНИЙ НОВГОРОД
С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОРЕЛ
Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.
Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.

ОРЕНБУРГ
А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.
А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.
А.П. ФОТ, д.т.н., проф.

ПЕРМЬ
С.М. БЕЛОБОРОДОВ, д.т.н.
В.Ф. МАКАРОВ, д.т.н.

РОСТОВ-НА-ДОНУ
А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

РЫБИНСК
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф.
В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.
А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

САМАРА
Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.
М.А. ЕВДОКИМОВ, д.т.н., проф.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

СЕВАСТОПОЛЬ
Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.

ТОМСК
А.В. КОЛУБАЕВ, д.ф.-м.н.
В.Е. ПАНИН, акад. РАН

ТУЛА
А.А. МАЛИКОВ, д.т.н., проф.
В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

ХАБАРОВСК
В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК
В.Л. БАСИНЮК, д.т.н.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ
А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф.
В.А. МАТВИЕНКО, к.т.н.

ДОНЕЦК
А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н.
Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в РОСКОМНАДЗОРе. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953 от 09.12.2015 г.

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2018

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

2018 Vol. 19 **1 (210)**

CONTENTS

Production tools and machinery for assembly

Zhitnikov Yu.Z., Piskunov V.V. Self-orientation of parts in the mating threaded surfaces in robotic assembly 3

Quality assurance. Testing. Monitoring

Mikaeva S.A., Boichuk M.I. Assembly and installation of splash protector 7

Minaev A.Ya., Korovkin Yu.V. The study of the dynamic properties of magneto-active elastomers and development of damping supports 10

Teptikov N.R., Reznichenko A.A., Gubarev P.V., Glazunov D.V. Mathematical methods of decision-making systems for the diagnosis and management of traction rolling stock 13

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Buslovich D.G., Dontsov Yu.V. Extrudable polymer-polymer composites based on ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) 16

Borodin A.V. Improvement in axle boxes of wagon cylindrical roller bearing 24

Mayba I.A., Glazunov D.V. Ways of regulation of the coefficient of friction to contact "wheel-rail" 27

Migranov M.Sh., Fuks-Rabinovich G.S., Shuster L.Sh., Migranov A.M. Wear-resistance of powder instrumental materials 32

Erlich B.M. Methodic for changing the state of harmonic oscillations 39

Industrial and design engineer's aid

Mozhegova Iu.N., Marikhov I.N. Software for automated design of air actuators in CAD COMPASS-3D 44

Information

Index of articles published in 2017 46

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Pressa Rossii" — **84967**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96
E-mail: sborka@machin.ru, http://www. mashin.ru
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

Chair of Editorial Advisory Board —
Member of Russian Academy of Science
V.I. KOLESNIKOV

Editors

MOSCOW

A.S. VASIL'EV (Chief editor)
V.V. BARDUSHKIN
I.A. BUYANOVSKY
M.V. VARTANOV
A.A. GUSEV
S.M. ZAKHAROV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
A.V. IGNATOV
Yu.G.KOZYREV
A.I. KUMENKO
I.A. LUBININ
E.A. MIKRIN
B.V. SHANDROV
A.G. KHOLODKOVA

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N.KULSHIN
A.A. SUPONIA

VOLGOGRAD
M.G. KRISTAL
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV

IZHEVSK
I.V. ABRAMOV
V.G. OSETROV
B.A. YAKIMOVICH

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR
B.N. MARJIN
A.M. SHPILEV

NABEREZHNYE CHELNY
S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

ORENBURG
A.N. POLYAKOV
A.I. SERDUK
A.P. FOT

PERM
S.M. VELOBORODOV
V.F. MAKAROV

ROSTOV-ON-DON
V.I. KOLESNIKOV
A.A. RYZHKIN

RYBINSK
V.F. BEZIAZYCHNYI
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV

SAMARA
Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV

ST.-PETERSBURG
E.V. SHALOBAEV

SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

TOMSK
A.V. KOLUBAEV
V.E. PANIN

TULA
A.A. MALIKOV
V.V. PREYS

KHABAROVSK
V.I. SCHPORT

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L KHEIFETZ

GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK
A.N. MIKHAILOV

Poland

P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

Executive editors of current issue:
E.M. NUZHDINA, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by ROSKOMNADZOR.
Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2018

УДК 621.757

Ю.З. Житников, *д-р техн. наук (Ковровская ГТА им. В.А. Дегтярева),*
В.В. Пискунов *(ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева", г. Ковров)*
E-mail: kgta_tms@mail.ru

Самодоориентация деталей, сопрягаемых по резьбовым поверхностям при роботизированной сборке

Предложена конструкция патрона для удержания резьбовых деталей с податливым креплением к шпинделю завинчивающего устройства и обоснование доориентации соединяемой детали при роботизированной сборке изделий.

It is proposed to hold chuck design for threaded parts with compliant mount to the spindle screwing device and justification of the self-orientation of the connected parts during the assembly robot products.

Ключевые слова: самодоориентация, резьбовое соединение, патрон, податливое крепление, завинчивающее устройство, роботизированная сборка.

Keywords: self-orientation, threaded connection, chuck, compliant mount, screwing device, robotic assembly.

Главная причина, сдерживающая использование роботов при сборке изделий, — низкая точность позиционирования руки робота в пространстве. Погрешности положения оси детали в руке робота по трем координатным осям составляют несколько миллиметров, а углы перекосов осей — несколько градусов. Для обеспечения гарантированной и качественной сборки резьбовых соединений относительное смещение осей не должно превышать 0,05...0,2 мм, а перекос осей — 1°30′ [2, 3].

Для ориентации исполнительного органа робота в пространстве применяют метод активной адаптации, при котором используют датчики линейных и угловых положений, а для отработки сигнала рассогласования осей соединяемых деталей вводят механическую систему.

Данный метод доориентации имеет ряд недостатков:

— в процессе роботизированной сборки практически невозможно устанавливать датчики на собираемых узлах, их устанавливают на вспомогательных поверхностях робота, внося дополнительную погрешность позиционирования;

— введение механических систем отработки сигнала рассогласования усложняет процесс роботизированной сборки, значительно снижается производительность и увеличиваются габаритные размеры устройства;

— данный метод обеспечивает только предварительную ориентацию соединяемых деталей и не доориентирует детали в процессе самой сборки, что приводит к заклиниванию соединяемых деталей из-за перекоса их осей.

Обеспечение надежной роботизированной сборки возможно методом, при котором доориентация соединяемых деталей происходит не только на предварительном этапе, но и в процессе самой сборки.

Для автоматизированной сборки резьбовых соединений и деталей, сопрягаемых по цилиндрическим поверхностям с гарантированным зазором, в работах [3—5] предложен метод пассивной адаптации (самодоориентации), при котором доориентация соединяемых деталей обеспечивается в процессе сборки.

Метод пассивной адаптации для качественной роботизированной сборки осуществим при одновременном выполнении трех требований:

— силового взаимодействия соединяемых деталей;

— податливости одной из деталей;

— вращения одной из деталей.

При автоматизированной сборке податливость одной из деталей (шпильки), удерживаемой в патроне с разрезными резьбовыми кулачками, обеспечивается за счет нежесткого крепления фланца завинчивающего устройства к плите исполнительного органа сборочного оборудования,

sb118.indd 3 10.01.2018 9:29:01

т.е. когда болты крепления установлены с зазором в отверстия фланца и плиты [3, 4]. Между фланцем и плитой расположена витая цилиндрическая пружина, а сборочное устройство стационарно установлено на жестком основании.

Если такое завинчивающее устройство поместить на руку робота, то, как в момент начала движения, так и при остановке его, возникают ускорения, а следовательно силы инерции. Под действием этих сил завинчивающее устройство, закрепленное нежестко на руке робота, представляющее собой систему с большой неуравновешенной массой, отклоняется от положения равновесия. Только после прекращения колебаний можно приступать к процессу доориентации и сборки соединяемых деталей.

Для сведения к минимуму неуравновешенности и практически исключения колебаний предложено податливость одной из деталей (шпильки) обеспечивать не за счет нежесткого крепления завинчивающего устройства к руке робота, а за счет податливости патрона для удержания резьбовой детали (рис. 1).

Угловая податливость патрона обеспечивается за счет зазора между диаметром шпинделя завинчивающего устройства и внутренним диаметром патрона, а относительная — этим же зазором и наличием фигурного паза под штифт в патроне. Для стабильного исходного положения патрона служит цилиндрическая или коническая пружина, расположенная между торцом шпинделя и дном отверстия в патроне. Торцы пружины вставлены в канавки на этих поверхностях.

Процесс автоматизированного совмещения осей соединяемых деталей опишем математическими уравнениями. Для исследования процесса сборки составим дифференциальные уравнения движения патрона с резьбовой деталью в процессе самодоориентации с резьбовым отверстием. Воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_j}=Q_j,$$

где Q_i — обобщенная сила, $Q_i=\frac{\delta A_i}{\delta q_i}$;

T — кинетическая энергия механической системы;

$\dot{q}_j$ — скорость от обобщенной координаты;

q_j — обобщенная координата;

δA_j — элементарная работа;

δq_j — элементарное изменение обобщенной координаты;

t — время.

На рис. 2 представлено произвольное положение механической системы:

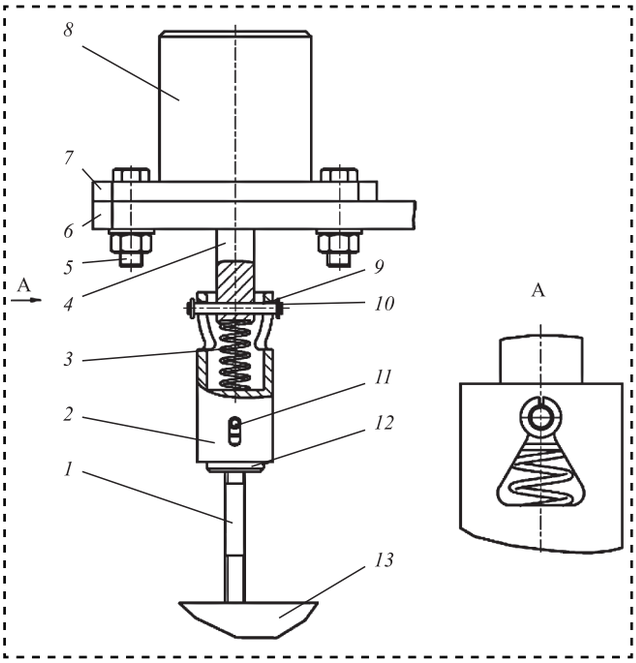


Рис. 1. Конструктивное исполнение патрона:
1 — шпилька (резьбовая или цилиндрическая деталь); *2* — патрон; *3* — пружина патрона; *4* — шпиндель завинчивающего устройства; *5* — болты жесткого крепления завинчивающего устройства к руке робота; *6* — плита исполнительного органа сборочного робота; *7* — фланец завинчивающего устройства; *8* — завинчивающее устройство; *9* — штифт крепления патрона к шпинделю; *10* — стопорное кольцо, препятствующее выпадению штифта *9*; *11* — штифт кулачков; *12* — разрезные резьбовые кулачки патрона; *13* — собираемый узел

$OXYZ$ — неподвижная система координат; $O_1X_1Y_1Z_1$ — подвижная система координат, жестко связанная с корпусом патрона завинчивающего устройства и движущаяся вместе с ним.

Патрон с резьбовой деталью вращается вокруг оси O_1Z_1 под действием пары сил $M_{кр}$. Равнодействующая сила давления резьбовой детали на поверхность узла равна N_1. Вес патрона G_2 приложен в центре масс (точка C). Вес шпильки — G_1. Пружина внутри патрона при подводе к собираемому узлу предварительно поджата. От этой пружины на завинчивающее устройство действует восстанавливающий момент, пропорциональный углу нутации θ ($M_{пр}$ = $\theta K_{пр}$, где $K_{пр}$ — угловая жесткость пружины). Скользящий по плоскости узла конец шпильки и поворачивающийся патрон вокруг штифта, а также гистерезисное трение в пружине создают сопротивление вращению M_c вокруг оси Z.

Исследуемая механическая система, совершая сложное движение, имеет шесть степеней свободы и четыре обобщенных координаты [1]. В качестве обобщенных координат примем углы Эйлера и координату z: φ — угол собственного

sb118.indd 4 10.01.2018 9:29:01

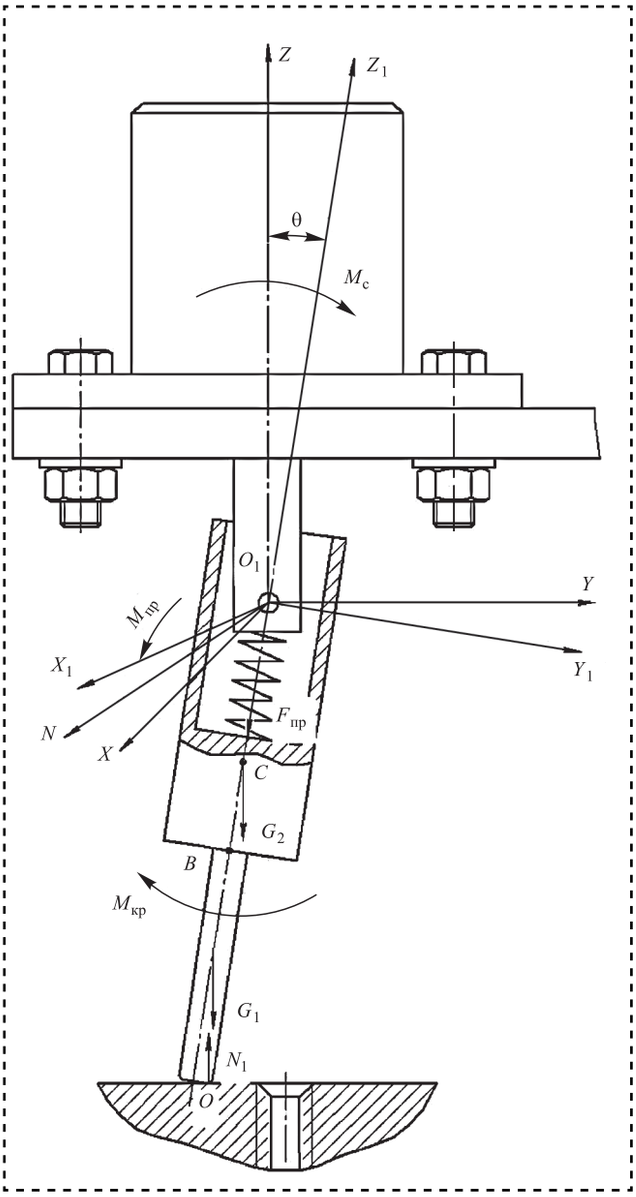


Рис. 2. Расчетная схема взаимодействия завинчивающего устройства с собираемым узлом

вращения патрона завинчивающего устройства вокруг оси Z_1; ψ — угол прецессии — поворот корпуса патрона завинчивающего устройства вокруг оси Z; θ — угол нутации — поворот патрона вокруг линии узлов O_1N, т.е. вокруг линии пересечения плоскостей неподвижной системы отсчета OXY и подвижной $O_1X_1Y_1$; Z — координата перемещения центра масс патрона.

Дифференциальные уравнения движения патрона со шпилькой (механической системы):

собственного вращения патрона и резьбовой детали:

$$I_1\left(2\theta\dot{\theta}\dot{\varphi} + \theta^2\ddot{\varphi} + I_3'\ddot{\varphi} + \ddot{\Psi}\right) = M_{кр} - M_с; \qquad (1)$$

прецессионного движения патрона:

$$I_3'\left(\ddot{\varphi} + \ddot{\Psi}\right) = M_{кр} - M_с; \qquad (2)$$

нутационного движения патрона:

$$I_1\ddot{\theta} - I_1\dot{\varphi}^2\theta = \\ = -M_{пр} - \theta G_2 CO_1 - G_1\left(\frac{OB}{2} + BO_1\right)\theta - N_1 l; \qquad (3)$$

движения центра масс патрона с резьбовой деталью:

$$m\ddot{z} = G_1 + G_2 + F_{пр}, \qquad (4)$$

где $I_1 = I_2$ — моменты инерции завинчивающего устройства относительно O_1X_1 и O_1Y_1;

I_3' — приведенный момент инерции подвижных частей завинчивающего устройства относительно оси O_1Z_1;

CO_1 — расстояние от оси штифта крепления патрона к шпинделю до центра тяжести корпуса патрона завинчивающего устройства;

OB — длина выступающей части шпильки;

BO_1 — расстояние от оси штифта крепления патрона к шпинделю до торца патрона;

l — расстояние от точки O_1 до точки O, или расстояние от оси штифта крепления патрона к шпинделю до торца шпильки.

При одновременном подводе завинчивающего устройства и вращении шпинделя конец шпильки, перекатываясь по поверхности узла, движется по спирали Архимеда, т.е. конец шпильки сканирует поверхность и даже при значительном (1...3 мм) относительном смещении осей шпильки и резьбового отверстия она попадает в зону отверстия.

Учитывая, что угол нутации мал, первым членом дифференциального уравнения (1) можно пренебречь, и оно становится аналогичным уравнению (2). Из первых двух уравнений следует, что при установившемся движении (вращении шпинделя с постоянной угловой скоростью $\dot{\varphi} = \omega = \text{const}$) момент сопротивления движению равен крутящему моменту $M_с = M_{кр}$. Уравнение (2) будет равно нулю, если угловые скорости собственного вращения $\dot{\varphi}$ и прецессии $\dot{\psi}$ — постоянные величины: $\dot{\varphi} = \dot{\psi} = \text{const}$.

Обоснуем возможность углового совмещения осей шпильки и резьбового отверстия, т.е. условие, при котором произойдет автоматизированное наживление резьбовых деталей.

Конец шпильки, попадая в зону резьбового отверстия, перекатывается по фаске. Их взаимодействие можно считать цилиндрическим "шарниром". Сложное движение патрона со шпилькой относительно резьбового отверстия описывается

sb118.indd 5 10.01.2018 9:29:01

дифференциальным уравнением нутационного движения (3).

После преобразования уравнение (3) будет иметь вид:

$$\ddot{\theta} - \theta\left[\varphi^2 + \frac{G_2CO_1}{I_1} + \frac{G_1}{I_1}\left(\frac{OB}{2} + BO_1\right)\right] = \\ = \frac{1}{I_1}\left(-M_{\text{пр}} - N_1 l\right). \quad (5)$$

Решение данного уравнения представляет собой сумму решений однородного дифференциального уравнения и частного решения данного уравнения:

$$\theta = \theta^{(1)} + \theta^{(2)}. \quad (6)$$

Однородное дифференциальное уравнение:

$$\dot{\theta} - k^2\theta = 0, \quad (7)$$

где

$$-k^2 = \dot{\varphi}^2 + \frac{G_2CO_1}{I_1} + \frac{G_1}{I_1}\left(\frac{OB}{2} + BO_1\right).$$

Решение уравнения (7) имеет вид:

$$\theta^{(1)} = D_1e^{kt} + D_2e^{-kt},$$

где D_1 и D_2 — постоянные интегрирования.

Найдем частное решение уравнения (6). Поскольку правая часть является постоянным членом, решением будет: $\theta^{(2)} = B$, тогда

$$-k^2B = \frac{1}{I_1}\left(-M_{\text{пр}} - N_1 l\right);$$

$$\theta^{(2)} = B = \frac{1}{k^2 I_1}\left(M_{\text{пр}} + N_1 l\right).$$

Решение уравнения (5):

$$\theta = D_1e^{kt} + D_2e^{-kt} + B.$$

Найдем постоянные интегрирования D_1, D_2:

$$\dot{\theta} = kD_1e^{kt} - kD_2e^{-kt}.$$

Начальные условия: $t = 0$; $\theta = \theta_\Sigma$; $\dot{\theta} = 0$, где θ_Σ — максимальный угол перекоса осей отверстия и резьбовой детали в момент начала самодоориентации резьбовой детали.

Тогда

$$D_1 = D_2 = \frac{\theta_\Sigma - B}{2}.$$

Таким образом, решение уравнения (5) является законом нутационного движения оси системы патрон—шпилька относительно

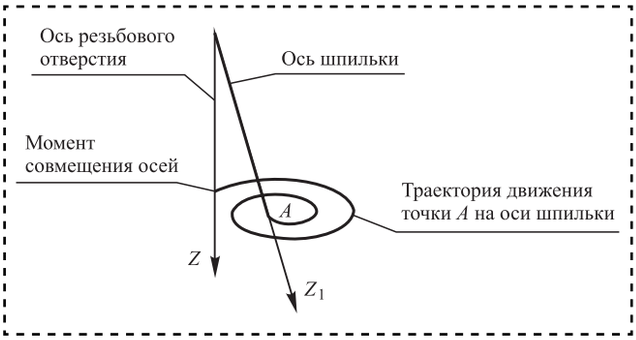


Рис. 3. Процесс совмещения осей шпильки и резьбового отверстия

"шарнира"—резьбовое отверстие—конец шпильки и запишется в виде:

$$\theta = \frac{\theta_\Sigma - B}{2}\left(e^{kt} + e^{-kt}\right) + B. \quad (8)$$

Прецессионное движение вызывает расходящиеся колебания оси патрона со шпилькой (рис. 3), при которых в какой-то момент оси резьбового отверстия и шпильки совместятся, а учитывая собственное вращение шпильки, произойдет ее автоматизированное наживление [3].

Процесс ввинчивания шпильки в резьбовое отверстие описывается теми же дифференциальными уравнениями (1—4), только в дифференциальном уравнении (3) нутационного движения уменьшается длина выступающей части шпильки.

Так как процесс самой сборки (завинчивания) аналогичен процессу предварительной ориентации, можно утверждать, что при завинчивании тоже происходит пассивная адаптация соединяемых деталей, исключающая заклинивание и обеспечивающая качественную сборку.

Следовательно, для предложенной конструкции обоснован процесс доориентации соединяемых резьбовых деталей на основе использования патрона для удержания шпильки, обеспечивающего пассивную адаптацию при роботизированной сборке изделий.

Библиографический список

1. **Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р.** Курс теоретической механики. Т. 2. М.: Наука, 1979.

2. **Гусев А.А.** Адаптивные устройства сборочных машин. М.: Машиностроение, 1979.

3. **Автоматизация** производственных процессов в машиностроении: учебник для машиностроительных вузов / Ю.З. Житников и др.; под общ. ред. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ТНТ, 2009.

4. **Житников Ю.З.** Автоматизация сборки резьбовых соединений. Ч. 1. Теоретические основы автоматизированной сборки изделий с резьбовыми соединениями: учеб. пособие. Ковров: КГТА, 1996.

5. **Пат. 2327556 РФ.** МПК[8] B 23 P 19/06. Многошпиндельный гайковерт для завинчивания шпилек с угловым рассогласованием осей / Ю.З. Житников; Б.Ю. Житников; Д.С. Воркуев; Ю.Н. Матросова; заявл. 03.07.06; опубл. 27.06.08. Бюл. № 18.

sb118.indd 6 10.01.2018 9:29:01

УДК 621.744.37

С.А. Микаева, *д-р техн. наук,* **М.И. Бойчук**
(Московский технологический университет)
E-mail: mikaeva@npo.lit.ru

Сборка и устройство каплеотбойника

Описана сборка и устройство каплеотбойника, предназначенного для удаления крупнодисперсных взвешенных частиц, насыщенных влагой, а также капель жидкости в подаваемом на очистку воздухе. Приведены основные технические характеристики установок.

The described the assembly and installation of splash protector is designed to remove coarse suspended particles saturated with moisture, and drops of liquid supplied for cleaning the air. The main technical of installations are given.

Ключевые слова: установка, устройство, сборка, воздух, удаление, частицы, технические данные, единицы измерения, значения.

Keywords: installation, device, assembly, air, destruction, particles, technical data, measurement units, values.

Соблюдение жестких гигиенических и санитарных правил — гарантия конкурентоспособности предприятия и выпуска качественной безопасной продукции. Для этого необходима производственная среда, включающая гигиену воздуха и поверхностей: комплекс тщательно спланированных профилактических и дезинфекционных мероприятий, регулируемых программой производственного контроля [1—5]. Постоянно растущие требования к качеству продукции и срокам хранения, рост резистентности микроорганизмов к используемым дезинфектантам и моющим средствам заставляют производителей пищевых продуктов искать дополнительные методы дезинфекции. Основываясь на собственных исследованиях и мировом опыте в области обработки воздуха и поверхностей [6—10], созданы удобные в использовании, энергоэффективные, малогабаритные и безопасные в эксплуатации устройства обеззараживания на основе амальгамных ультрафиолетовых ламп.

Каплеотбойник используют для удаления крупнодисперсных взвешенных частиц, насыщенных влагой, а также капель жидкости в подаваемом на очистку воздухе. Каплеотбойники ВЕНТЛИТ для комплексов очистки воздуха от примесей и дурнопахнущих веществ выпускает ООО ТД "ЛИТ" (Москва).

Условия устойчивой работы каплеотбойника:

— температура окружающего воздуха от −45 °С до +40 °С;

— относительная влажность окружающего воздуха до 100 % при температуре +25 °С.

Климатическое исполнение каплеотбойника У1: эксплуатация в районах с умеренным климатом, категория размещения — уличное по ГОСТ 15150—69.

Основные технические характеристики каплеотбойника

Присоединительные размеры (диаметр), мм вход/выход	499
Габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм	1585×1206×2062
Масса, кг	200
Число кассет сеток каплеотбойника (фильтров), шт.	4
Тип кассет сеток каплеотбойника (фильтра)	750×750×40
Материал кассеты сеток каплеотбойника (фильтра)	Коррозионо-стойкая сталь
Материал корпуса каплеотбойника	Коррозионо-стойкая сталь

sb118.indd 7 10.01.2018 9:29:02

Каплеотбойник состоит из корпуса *1*, установленного на опоре *2* (рисунок). В задней стенке корпуса расположено входное отверстие *6*, а в верхней стенке корпуса — выходное отверстие *7*, к которым подключены воздуховоды.

Внутри корпуса расположены выравнивающие решетки *3* и четыре кассеты с сетками каплеотбойника *4*. Для обслуживания предусмотрен люк *5*, закрывающийся поворотными замками.

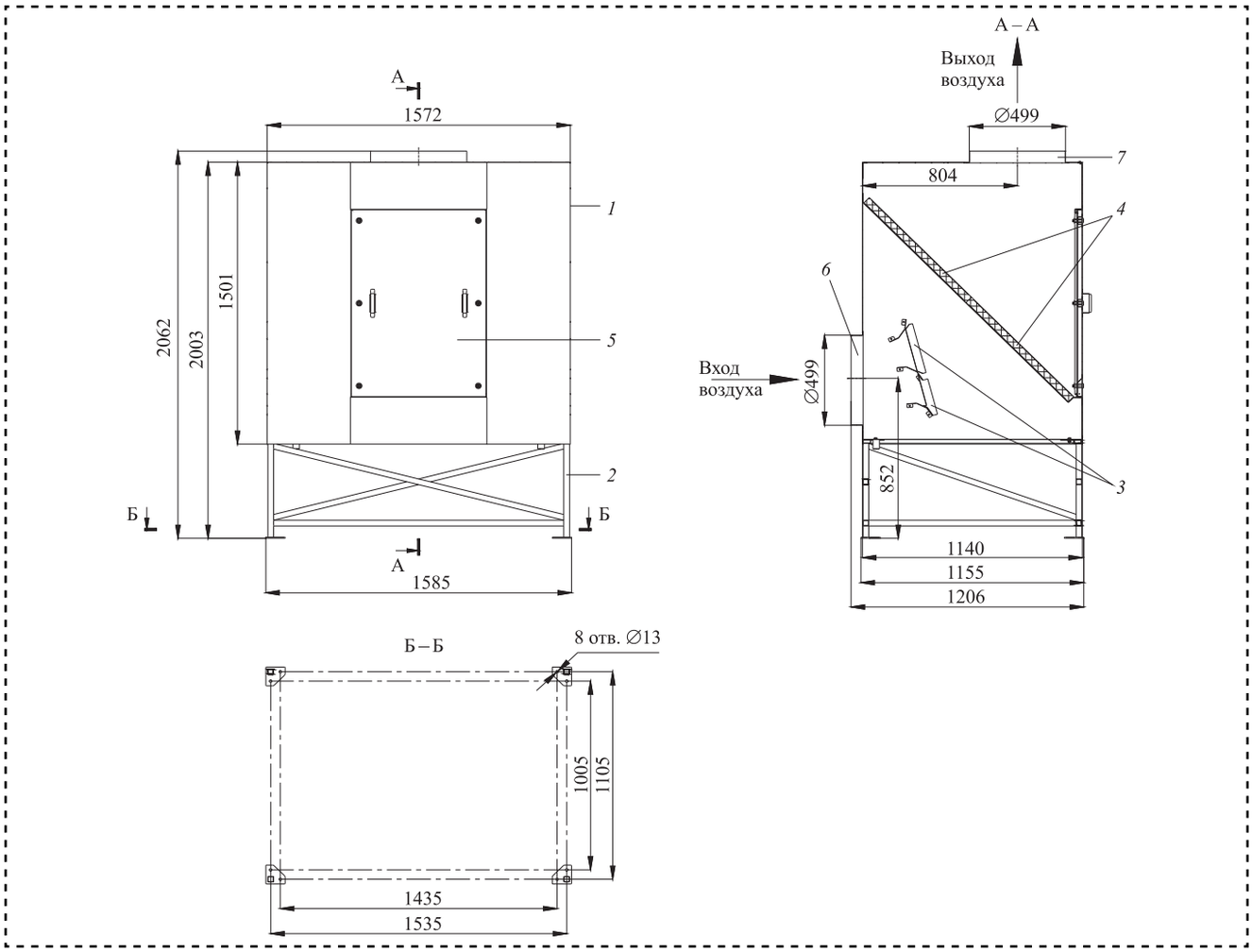
Каплеотбойник монтируют перед установкой очистки воздуха от примесей. К входному и выходному отверстиям подключают воздуховоды, по которым проходит нуждающийся в очистке воздух.

По воздуховоду через входное отверстие воздух поступает в проточную часть каплеотбойника, проходит через выравнивающие решетки, предназначенные для распределения потока обрабатываемого воздуха внутри корпуса каплеотбойника. Далее он проходит через кассеты с сетками для удаления крупнодисперсных взвешенных частиц, насыщенных водой, а также капель жидкости, и поступает через выходное отверстие по воздуховоду в установку очистки воздуха от примесей.

Установки производят из коррозионно-стойкой стали марки AISI 304 (если предполагается работа с более агрессивными жидкостями — AISI 316).

Массовая доля элементов стали AISI 304, %

Углерод (C)	⩽0,08
Хром (Cr)	18,0...20,0
Марганец (Mn)	⩽2,0
Кремний (Si)	⩽0,75
Фосфор (P)	⩽0,045
Сера (S)	⩽0,03
Селен (Se)	0,15
Железо (Fe)	Остальное



Основные элементы каплеотбойника:

1 — корпус; *2* — опора; *3* — выравнивающая решетка; *4* — кассеты с сетками; *5* — люк обслуживания; *6* — входное отверстие; *7* — выходное отверстие

sb118.indd 8 10.01.2018 9:29:02

Физические свойства стали AISI 316

Плотность, г/см^3	8,00
Температура плавления, °С	1450
Коэффициент теплового расширения, К$^{-1}$	$17{,}2\cdot10^{-6}$
Модуль упругости, ГПа	193
Теплопроводность, Вт/(м·К)	16,2
Удельное электрическое сопротивление, Ом·см	$0{,}072\cdot10^{-6}$

Механические свойства стали AISI 304

Прочность на сжатие, МПа	505
Предел текучести, МПа	210
Прочность на разрыв, МПа	520...720
Деформация растяжения, %	45

Помимо высокой коррозионной стойкости аустенитная сталь AISI 304 обладает высокой пластичностью, что позволяет ее широко использовать в штампованных изделиях с высоким уровнем вытяжки и сложным рельефом. Благодаря низкому содержанию углерода сталь AISI 304 обладает улучшенными сварочными характеристиками. Самый большой объем потребления стали AISI 304 в нефтехимических и химических производствах.

К работе с элементами каплеотбойника допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомленные с устройством элемента и правилами его эксплуатации.

Металлические поверхности должны быть чистыми, острые кромки притуплены, заусенцы не допускаются.

Комплекс работ по техническому обслуживанию каплеотбойника:

— визуальный контроль герметичности стыков вентиляционной системы через 2000 ч эксплуатации;

— промывка проточной части каплеотбойника и кассет с сетками через 2000 ч эксплуатации;

— проверка герметичности стыков дренажа каплеотбойника и отсутствия загрязнений в нем.

Результаты проверки герметичности стыков вентиляционной системы и сведения о промывке проточной части и кассет с сетками каплеотбойника и всех неисправностях, обнаруженных в ходе эксплуатации заносят в журнал эксплуатации каплеотбойника.

Промывку проточной части каплеотбойника и кассет с сетками осуществляют следующим образом: перекрывают, в случае необходимости, основной воздуховод перед входным отверстием *6* (см. рисунок); открывают люк обслуживания *5*; промывают проточную часть каплеотбойника и кассеты с сетками *4* чистой водой под напором не менее 2...3 атм.; закрывают люк обслуживания *5*; открывают основной воздуховод перед входным отверстием *6*.

От микробиологической чистоты воздуха зависит не только здоровье человека, но и эффективность производственных процессов на предприятиях. Современные фильтры удаляют твердые частицы, но не уничтожают биологические объекты воздушной среды, при этом микроорганизмы могут освобождаться от прикрепления к фильтрам и возвращаться в воздушный поток. Осажденные на фильтрах микроорганизмы проникают сквозь волокнистую структуру фильтра и далее в воздушную среду помещений. При конденсации в фильтрах влаги и недостаточном уходе существуют риски возникновения колоний плесени и других микроорганизмов. Для решения проблем микробиологического загрязнения воздуха и систем вентиляции традиционно рекомендуется использовать каплеотбойники для удаления крупнодисперсных взвешенных частиц, насыщенных влагой, а также капель жидкости в подаваемом на очистку воздухе.

Библиографический список

1. **Микаева С.А.** Разработка и исследование технологии производства компактных люминесцентных ламп информационно-измерительных приборов и систем: дис.... д-ра техн. наук. М.: Московская государственная академия приборостроения и информатики. 2007.
2. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Установки для обеззараживания воздуха и воды // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. С. 41—46.
3. **Григорьев Н.Д., Овчукова С.А.** Общая электротехника: учеб. пособие / Н.Д. Григорьев, С.А. Овчукова. ФГБОУ ВПО МГУПС. Москва, 2012.
4. **Установки** для обеззараживания воздуха и воды ультрафиолетовым излучением / Е.С. Беленикина и др. // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 1. С. 63—68.
5. **Установки** обеззараживания воздуха в системах вентиляции серии "Мегалит" / О.Е. Железникова и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 10. С. 11—14.
6. **Облучатели** бактерицидные / О.Е. Железникова и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 11. С. 3—6.
7. **Железникова О.Е., Микаева С.А., Микаева А.С.** Системы обеззараживания ультрафиолетом // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 2. С. 44—48.
8. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Обеззараживание ультрафиолетовым излучением // Учебный эксперимент в образовании. 2015. № 1 (73). С. 82—89.
9. **Микаева С.А., Микаева А.С.** System of disinfection by ultraviolet radiation // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2015. № 11 (224). С. 59—64.
10. **Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И.** Сборка установки удаления запахов контейнерного типа // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 3. С. 28—35.

sb118.indd 9 10.01.2018 9:29:02

УДК 620.17

А.Я. Минаев, *канд. техн. наук,* **Ю.В. Коровкин**
(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)
E-mail: mi0804mi@yandex.ru

Изучение динамических свойств магнитоактивных эластомеров и разработка демпфирующих опор

Создан управляемый демпфер на основе образца магнитореологического эластомера, способный менять свои динамические характеристики под действием магнитных полей, что позволяет использовать его в качестве виброизолирующего опорного элемента при сборке машин.

The creation of a controlled damper based on a sample of a magnetorheological elastomer that has been tested and demonstrated the ability to change its dynamic characteristics under the influence of magnetic fields makes it possible to use it as a vibration isolating support element in the assembly of machines.

Ключевые слова: регулируемые цилиндрические клеевые соединения, качество сборки, методы сборки, дозирующие устройства.

Keywords: adjusting cylindrical adhesive joints, joining quality, joining methods, technological process of joining, dosing machine.

Надежное и безотказное использование новых образцов техники зависит от важной динамической характеристики — уровня вибраций на различных режимах эксплуатации. Для вибрационной защиты все более широкое применение находят синтетические материалы полиуретаны — эластомеры: гетероцепные полимеры, широко применяемые в различных изделиях в условиях агрессивных сред и больших знакопеременных нагрузок.

К новым разновидностям таких материалов относят магнито- и электроактивные эластомеры, разработанные в ГНЦ РФ ГНИИХТЭОС. Достоинство использования эластомеров состоит в том, что их упругостью и деформацией можно управлять с помощью постоянных и переменных магнитных и электрических полей. Эти материалы зачастую называют "умными" или "интеллектуальными". Они обладают уникальным свойством — значительной упругой деформацией и фактически полным обратимым изменением жесткости под действием управляющих факторов: магнитных, электрических и электромагнитных полей. Это позволяет использовать их в разрабатываемых новых образцах технических изделий и машинной техники, где успешная эксплуатация зависит в первую очередь от таких динамических характеристик, как диапазон расположения резонансных частот и амплитуд их колебаний. Исследования динамических свойств магнитоактивных, резиноподобных эластомеров показывают возможности их использования в транспорте и во многих других областях, например, робототехнике, медицине (в протезах).

Цель работы — испытание образцов магнитореологических эластомеров, исследование их способности менять вибрационные характеристики в широком диапазоне частот под действием магнитных полей, обоснование и разработка на основе данного эффекта перспективных способов и устройств гашения колебаний.

С помощью разработки и обоснования технологии встраивания магнито- и электропроводящих составляющих микро- и наночастиц материалов в матрицу испытуемого образца изготовили опытные изделия.

На виброиспытательном комплексе ИМАШ РАН установлена возможность управления колебаниями при возбуждении резонансных частот в испытуемых образцах — магнитореологических эластомерах — воздействием на них магнитными полями [1—4].

Данный испытательный комплекс позволяет исследовать также динамические противоударные свойства разрабатываемых образцов материалов.

Виброиспытательный комплекс состоит из динамического стенда, на столе которого закре-

sb118.indd 10 10.01.2018 9:29:02

плен один из образцов (рис. 1 на стр. 2 обложки). Образцы могут иметь различную эластичность.

Виброиспытательный комплекс оснащен приборами: задающим генератором, усилительной аппаратурой и средствами измерения вибрации. Модули управления амплитудой и частотой колебаний на столе вибратора на входе испытуемого образца задавали с помощью виртуальных программ.

Серии экспериментов с образцами эластомеров установили возможность влияния на расположение резонансных частот в сторону их увеличения под действием магнитных полей.

На рис. 2 на стр. 2 обложки показано влияние магнитных сил на сдвиг расположения амплитуд резонансных частот испытуемого образца. При расстоянии между магнитом и образцом 1,5 мм построена АЧХ — *1* с резонансным пиком 150 Гц при максимальном действии на образец магнитных сил. При расстоянии между образцом и магнитом 5 мм построена АЧХ — *2* с резонансным пиком 90 Гц, а для слабого воздействия магнитных сил на образец — АЧХ — *3* с резонансной частотой вблизи 75 Гц.

Установлено, что для данного испытуемого образца при увеличении сил магнитных полей возможно изменять или смещать резонансную частоту в 2 раза (от 75 до 150 Гц) в более высокочастотную область.

Данный широкий диапазон позволяет уверенно изменять расположение резонансных частот магнитореологического эластомера.

Исследования возможности управления резонансными частотами опытного образца магнитореологического эластомера с помощью воздействия на него различной силы магнитными полями постоянного магнита позволяют разрабатывать способы и устройства для управления демпфером на основе испытуемого материала — магнитореологического эластомера (магнитоэластика). Предложено использование магнитоэластика в качестве демпфера для гашения колебаний, например, на опорах двигателя. Предлагаемое исследование работы активного демпфера проводили на испытательном вибростенде (рис. 3 на стр. 2 обложки), моделирующем реально существующие колебания или вибрации, передаваемые на основание опоры, т.е. при кинематическом возбуждении, которым является управляемый демпфер. Кинематическое возбуждение колебаний или вибраций возникает от совершенно различных источников рабочих механизмов и устройств, на которых устанавливается демпфер. При испытании со стола вибратора через опорный диск на основание опоры демпфера передаются (моделируются) колебания, которые также возможно гасить путем отстройки от резонансных частот воздействием магнитных полей на магнитореологический эластомер.

Для активно управляемой работы устройства используют опорные сигналы с датчиков, которые передаются в блоки аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Полученные сигналы с АЦП обрабатывают в компьютере и подаются на вход ЦАП (обратное преобразование), и далее на управление магнитным полем опоры — демпфера, согласно разрабатываемому способу. Предлагаемая разработка устройства гашения колебаний предусматривает возможность отстройки от резонансных частот, приходящих на активно управляемую демпферную опору с двух взаимно противоположных направлений сверху и снизу опоры, т.е. вибраций, приходящих на демпферную опору, как от изделия, так и от основания или фундамента, на котором она установлена.

Сила действия магнитных полей неодимовых магнитов может достигать значительных величин. Испытуемый образец, первоначально имеющий цилиндрическую форму, под действием магнитных полей приобретает коническую форму. Деформация формы образца происходит в результате наиболее сильного притяжения частиц наполнителя (карбонильного железа) в нижней части расположения магнита.

Магнитореологические эластомеры перспективны в вопросах, связанных с созданием новых композиционных материалов с наполнителями, которые придавали бы инновационному материалу заданные технические параметры. Аналитическое моделирование динамических свойств для создания таких композиционных материалов весьма затруднительно. Тем не менее на начальных этапах возможно создавать приближенные расчетные модели к реально существующим на практике. Для уточнения создаваемых моделей удобно использовать полученные по результатам испытаний динамические характеристики: например, АЧХ с расположением резонансных частот и амплитуд. Аналитические модели полезны при выборе дальнейшего направления испытаний при создании новых материалов, но не могут описать всех динамических свойств реальных эксплуатируемых устройств либо объектов. Поэтому опытно-экспериментальное изучение новых созданных материалов является первостепенным и определяющим направлением в создании инновационных образцов техники.

На последующих этапах испытаний магнитореологических эластомеров исследовали факто-

sb118.indd 11 10.01.2018 9:29:02

ры внешних воздействий на существенное изменение демпфирующих свойств исследуемых материалов: экстремальных величин динамической нагрузки; экстремальных величин статической нагрузки; ресурса (изменение динамических свойств материала в процессе длительной эксплуатации); температурный.

Для получения качественного результата и определения направления дальнейших разработок использовали образцы с матрицами различной эластичности: малой, средней и повышенной (пластичной). Частицы наполнителя матрицы — с малыми, средними и крупными размерами. Концентрация частиц карбонильного железа — минимальная и максимальная, чтобы при перестроении частиц под действием сил магнитного поля они могли бы контактировать друг с другом.

Проведенная работа показывает предельные границы отстройки от возникающих резонансных частот для более широкого использования эластомеров в качестве виброгасящих материалов. В данных испытаниях отстройку или увод от резонансных частот проводили с помощью сил магнитных взаимодействий с частицами карбонильного железа. Использование наполнителей с более сильным диполь-дипольным взаимодействием расширяет границы отстройки от резонансных частот.

Разрабатываемое устройство представляет собой систему с обратной связью, позволяющее постоянно отслеживать предельно допустимые вибрационные режимы эксплуатации работающего объекта и настраивать систему в автоматическом режиме на минимально возможные вибрации.

Данную разработку можно использовать, например, при активном управляемом гашении колебаний и вибраций в различных машинах. Использование управляемых с переменной жесткостью, упругих эластомеров в качестве захватов возможно и в робототехнике, и в медицинской промышленности для протезирования, в оборонных и космических изделиях.

На основе полученных результатов в разрабатываемом устройстве предлагается использование системы связанных между собой особым образом демпферов для создания пространственных виброизолирующих платформ. Предлагаемые пространственные или трехмерные 3D-платформы могут быть использованы в качестве систем для отстройки (ухода) от резонансных частот при работе высокоточной аппаратуры с различными сканирующими, лазерными, оптическими микроскопами высокого разрешения, наноманипуляторами и другими высоко- и нанотехнологичными устройствами.

Проведенные исследования магнитореологических эластомеров показали потенциальную перспективу использования их при сборке машин в качестве динамических демпферов, виброзащитных устройств, активных и управляемых звеньев.

Библиографический список

1. **Минаев А.Я., Коровкин Ю.В.** Экспериментальные исследования демпфирующих свойств магнитореологических эластомеров // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 4. С. 34—38.

2. **Коровкин Ю.В., Минаев А.Я., Степанов Г.В.** Экспериментальные исследования динамических свойств магнитореологических эластомеров // VII Всероссийская конференция "Актуальные проблемы машиностроения". 2015. С. 789—792.

3. **Korovkin Yu.V., Minaev A.Ya., Stepanov G.V.** Dynamic Properties of Magnetically Active Elastomer Composites in Laboratory Tests // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, No. 5. P. 299—302.

4. **Минаев А.Я., Коровкин Ю.В, Израилович М.Я.** Экспериментальные исследования динамических свойств и внутреннего трения магнитореологических эластомеров // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 9. С. 15—18.

sb118.indd 12 10.01.2018 9:29:02

УДК 519.711.3:656.2

Н.Р. Тептиков, А.А. Резниченко, П.В. Губарев, Д.В. Глазунов, *канд-ты техн. наук*
(Ростовский государственный университет путей сообщения)
E-mail: glazunovdm@yandex.ru

Математические методы принятия решений в системах диагностики и управления на тяговом подвижном составе

На примерах задач ремонта локомотива проиллюстрирована возможность применения автоматов советчиков, использующих адаптированный соответствующим образом математический аппарат: корреляционный анализ, теорию распознавания образов, регрессионный анализ, теорию нечетких множеств и др. Рассмотрены вопросы отбора наиболее информативных признаков, нахождения корреляционных связей между ними, влияние ошибок на построение математической модели.

On examples of task repair of the locomotive is illustrated by the possibility of using machines of advisors using adapted accordingly, the mathematical apparatus of correlation analysis, the theory of pattern recognition, regression analysis, fuzzy sets, etc. Considered in selecting the most informative features, finding correlations between them, the impact of errors in the construction of a mathematical model.

Ключевые слова: локомотив, математический аппарат, корреляционные связи, теория нечетких множеств, регрессионный анализ, автоматы-советчики.

Keywords: locomotive, mathematical apparatus of correlation, fuzzy set theory, regression analysis, machine guns advisers.

Совершенствование работы железнодорожного транспорта существенным образом зависит от внедрения в практику кибернетических методов анализа и принятия решения. На примерах задач ремонта локомотива проиллюстрируем возможность применения автоматов-советчиков, использующих адаптированный соответствующим образом математический аппарат: корреляционный анализ, теорию распознавания образов, регрессионный анализ, теорию нечетких множеств и др. Для обеспечения работоспособности электроподвижного состава (ЭПС) и предупреждения постепенных отказов, вызванных износом и старением машин, аппаратов и другого оборудования, на большинстве железных дорог Российской Федерации предусмотрена система планово-предупредительных ремонтов [1].

Существует два подхода к организации и проведению ремонта ЭПС. В первом случае на основании приказов ОАО "РЖД" и правил ремонта локомотив изымается из эксплуатации при достижении определенной наработки, заданной заранее и установленной на основании многолетней практики эксплуатации, опыта и интуиции разработчиков [1]. Для выполнения работ по этой программе необходимо привлекать большое количество ремонтных бригад. Ситуация осложняется тем, что для модернизированных и новых локомотивов отсутствует длительная практика эксплуатации [2]. Во втором случае ремонт осуществляется только в случае отказа. Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава с учетом его фактического состояния должны быть основаны на исчерпывающей и достоверной информации о состоянии оборудования каждого локомотива, которую реально получить с помощью специализированных диагностических комплексов [10]. Это подтверждается опытом эксплуатации и ремонта локомотивов на Северо-Кавказской железной дороге [3, 10].

Широкое использование диагностических комплексов на электровозоремонтных заводах и в локомотивных депо позволит быстрее и качественнее проводить техническое обслуживание и ремонт ЭПС, значительно сократить время и средства на поиск неисправностей, исключить субъективизм при проведении контрольных пусконаладочных испытаниях электровозов,

sb118.indd 13 10.01.2018 9:29:02

накапливать статистическую информацию и т.д. [4, 10].

Использование результатов диагностики решит следующие вопросы: предупреждение заданного (одного или нескольких) вида отказа; оптимизацию технологических процессов движения поездов, ремонта и обслуживания локомотивов; определение остаточного ресурса какого-либо узла и прогнозирование его дальнейшей работы. Однако указанные достоинства системы диагностирования невозможно реализовать без математической обработки данных и применения соответствующего математического аппарата.

Рассмотрим в качестве примера проблему ремонта якоря тягового электродвигателя локомотива. В настоящее время сложились объективные причины для определения остаточного ресурса изоляции якоря тягового двигателя локомотива в объеме капитального ремонта (КР). Современные методы исследования состояния изоляции не могут достаточно четко спрогнозировать ее работу при дальнейшей эксплуатации якоря двигателя, ее долголетие. В задаче моделирования и математической обработки полученных в эксплуатации и при испытаниях результатов выходным параметром Y является принятие какого-либо решения: пропитка лаком изоляции и запуск в эксплуатацию; перемотка изоляции. Выходной параметр зависит от ряда входных факторов, влияющих на состояние объекта исследования (изоляции). В качестве входных факторов X_i можно назвать следующие: пробег локомотива; скорость хода на участке движения; характер профиля участка; масса состава; время хода и стоянки локомотива; климатическая зона работы локомотива; количество потребленной (отданной) энергии; вид изоляции и т.д.

Рассмотрим пример, объясняющий актуальность разработки автоматов советчиков для управления технологическим процессом на тяговом подвижном составе (табл. 1).

Математическое решение поставленной технологической задачи существенным образом зависит от характера и свойств исходных данных. Проблемы сбора информации при моделировании:

1. Формирование табл. 1 осуществляется на основании измерений параметров технологического процесса и опроса экспертов. В связи с этим возникает ряд вопросов: что и как измерять; как интерпретировать результаты счета; как влияют ошибки измерения на качество построенной модели.

Поясним суть проблемы на простом примере. Пусть искомая модель имеет вид:

$$Y = A_1X_1 + A_2X_2. \quad (1)$$

Таблица 1

Результаты наблюдений за объектами исследований X_{ij}

Номер наблюдения, i	Факторы				Принимаемое решение
	X_1	X_2	...	X_m	Y
1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1m}	...
2	X_{21}	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
n	X_{n1}	...	...	X_{nm}	...

Примечание. $j = 1, 2, ..., m$ — значение j-го фактора в i-м наблюдении.

Для идентификации этой модели (расчета коэффициентов A_1 и A_2) получены результаты наблюдений (табл. 2). Они генерировались зависимостью:

$$Y = 2X_1 + X_2.$$

В дальнейшем для оценки качества используем модель, построенную по эмпирическим данным табл. 2.

Подставляя результаты 1-го и 2-го наблюдений в выражение (1), получаем систему двух уравнений относительно неизвестных коэффициентов A_1 и A_2, которая имеет бесчисленное множество решений. Если хотя бы в одном из измерений произошла ошибка, например, вместо $X_{11} = 2$ имело место $X_{11} = 2{,}01$, то решение относительно A_1 и A_2: $\overline{A}_1 = 0$, $\overline{A}_2 = 2{,}5$. Это решение не имеет ничего общего с истинными значениями $A_1 = 2$ и $A_2 = 1$.

Предлагается для регуляризации процесса сбора информации использовать методы активного эксперимента [6] и анализ вычислительных задач на корректность [7].

Проблема сбора информации состоит в том, что некоторые факторы определяются не измерением и расчетом, а на основании опыта и интуиции ремонтных бригад и экспертов в депо и на ремонтных заводах. Часто человек не может объяснить, почему он принял то или иное решение. Оно возникает интуитивно. В своей повседневной работе при оценке состояния какого-либо объекта человек пользуется понятиями типа "хорошо", "плохо", "пойдет", "нормально", т.е. он использует лингвистические переменные, отражающие качество поступающей информации, логику выбора решения в данной ситуации, со-

Таблица 2

Результаты расчета коэффициентов

i	A_1	A_2	Y
1	2	1	5
2	4	2	10
3	1	2	4

sb118.indd 14 10.01.2018 9:29:03

ставляющие сущность теории нечетких множеств, с помощью которой возможно перевести эти данные в числовую форму [8].

При сборе информации не все входные факторы, названные экспертами, равно информативны. Возникает задача отбора из названных наиболее информативных и выявления между ними корреляционных связей. Решить этот вопрос можно используя методы корреляционного анализа [5].

2. Если выходной параметр системы, как следует из анализа приведенных технологических задач, принимает дискретные значения типа "да", "нет" из ограниченного набора (например, при выборе ступени торможения или исследовании якоря), то используют аппарат теории распознавания образов [9], а если множество значений (при оценке времени движения отцепа по участку или определении ресурса якоря), то — методы регрессионного анализа [5].

Рассмотрим эти процедуры подробнее. Предположим, что в табл. 1 данные уже представлены в числовой форме и достаточно информативны. Для удобства графической иллюстрации предположим, что $n = 2$. Таким образом, различные состояния объекта можно описывать с помощью вектора $X = (X_1, X_2)$. В зависимости от значений этих признаков, характеризующих ситуацию, принимается то или иное значение Y [9]. Если Y принимает дискретные значения и их число ограничено, то при этом удобно использовать теорию распознавания образов. В этом случае задача принимает следующий вид: необходимо выделить в пространстве факторов X_1 и X_2 группы однотипных (с точки зрения решения) ситуаций и разработать решающее правило, которое позволяло бы принимать решение в каждом конкретном случае: для якоря двигателя это "продолжение эксплуатации" или "перемотка изоляции".

Если величина Y непрерывна или принимает дискретные значения, то удобнее применить регрессионный анализ. В этом случае принимаемое решение Y имеет уже функциональную зависимость $Y = f(X_1, X_2)$. Регрессионный анализ по полученным факторам $X_1, X_2,..., X_n$ позволит оценить, на какой стадии "жизни" находится изоляция и как долго она будет работать в конкретных условиях. Описанная методика решит вопросы экономического характера: эксплуатировать локомотив какое-то время, а потом выполнить КР в необходимом объеме; эксплуатировать до поломки; заранее перемотать изоляцию (даже если ее срок службы не истек) и др.

Применение указанных методов теории распознавания образов и регрессионного анализа требует в свою очередь исследования условий их применения и адаптации к условиям задачи. Наиболее известный метод построения регрессионной зависимости — метод наименьших квадратов — может быть применен, если: значения факторов X_i заданы без погрешностей; факторы X_i независимы друг от друга; значения выходной переменной Y некоррелированны и имеют одну и ту же дисперсию; заранее известна корректная форма уравнения регрессии; ошибки наблюдений Y распределены по нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю; объем наблюдений достаточен для получения статистически обоснованных выводов [5]. Если эти условия в реальной задаче не выполняются, то следует или выбирать иной метод, или адаптировать существующий.

Выводы

1. Осуществлена математическая постановка технических задач тягового подвижного состава в рамках теории распознавания образов и регрессионного анализа.

2. Исследованы проблемы сбора информации для моделирования: вычислительные проблемы, вопросы обработки экспертной информации, отбора информативных признаков.

Библиографический список

1. **Тептиков Н.Р., Машнин Д.В.** Принципы организации процессов технического обслуживания и ремонта электровозов // Актуальные проблемы развития ж.-д. транспорта и роль молодых ученых в их решении: сб. науч. тр. 2-я Междунар. отраслевой науч.-техн. конф. Ростов н/Д.: РГУПС, 2000. С. 79—80.
2. **Лябах Н.Н., Тептиков Н.Р., Матвиенко В.П.** Проблемы технической диагностики электроподвижного состава // Интеграция отраслевой и вузовской науки: проблемы современного машиностроения: материалы междунар. научн.-техн. конф. Ростов н/Д.: РГАСХМ, 2000. С. 126—127.
3. **Тептиков Н.Р.** Стационарная автоматизированная испытательная станция для послеремонтных испытаний электровозов. Ростов-н/Д.: РГУПС, 2011. 112 с.
4. **Тептиков Н.Р., Вартбаронов Э.А., Матвиенко В.П.** Стационарная автоматизированная испытательная станция послеремонтных испытаний электровозов: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 2. РГУПС, Мин. Воды, 2000. С. 22—23.
5. **Иванченко В.Н., Лябах Н.Н., Гуда А.Н., Моисеенко И.Е.** Математическое моделирование микропроцессорных систем управления на железнодорожном транспорте. Ростов н/Д.: РИИЖТ, 1984. 80 с.
6. **Круг Г.К., Сосулин Ю.А., Фатуев В.А.** Планирование эксперимента в задачах идентификации экстраполяции. М.: Наука, 1977. 208 с.
7. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Н.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 286 с.
8. **Иванченко В.Н., Лябах Н.Н., Ковалев С.М.** Принятие решений на железнодорожном транспорте на основе использования теории нечетких множеств. Ростов н/Д: РИИЖТ, 1987. 28 с.
9. **Лябах Н.Н., Пирогов А.Е.** Автоматизация технологических процессов на железнодорожном транспорте на основе микропроцессоров с применением методов распознавания: учеб. пособие. Ростов н/Д: РИИЖТ, 1984. 75 с.
10. **Губарев П.В., Глазунов Д.В., Мищихина Е.С.** Анализ системы ремонта и диагностики локомотивов по фактическому состоянию // Труды международной научно-практической конференции "Транспорт-2013". Ростов н/Д: РГУПС, 2013. С. 143—144.

sb118.indd 15 10.01.2018 9:29:03

УДК 678.073:661.481

С.В. Панин, *д-р техн. наук,* **Л.А. Корниенко,** *канд. физ.-мат. наук*
(Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск),
В.О. Алексенко, Д.Г. Буслович, Ю.В. Донцов *(Томский политехнический университет)*
E-mail: rosmc@ispms.tsc.ru

Экструдируемые полимер-полимерные композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ)*

Для получения экструдируемых, износостойких, твердосмазочных полимерных композитов для аддитивных технологий производства в целях дальнейшего их использования в качестве фидстоков для 3D-печати исследованы механические и триботехнические характеристики полимер-полимерных композиций СВМПЭ. Изучены смеси СВМПЭ с привитыми и блок-сополимерами полиэтилена низкого давления (HDPE-g-VTMS, HDPE-g-SMA, HDPE-b-EVA), полипропиленом, блок-сополимерами на основе полипропилена и полиамида с линейным полиэтиленом низкой плотности (PP-b-LLDPE, PA-b-LLDPE), а также сшитым полиэтиленом (PEX-b). Выбор полимерных компонент для сверхвысокомолекулярной матрицы, обеспечивающих увеличение технологичности (экструдируемости) СВМПЭ, обусловлен поиском доступных (промышленно выпускаемых) и эффективных наполнителей для разработки износостойких полимерных композитов для 3D-технологий производства. Конечная цель — изготовление прочных и износостойких изделий сложной формы для трибоузлов в машиностроении и медицине. Исследованы экструдируемость и износостойкость полимер-полимерных композиций на основе СВМПЭ при сухом трении скольжения при различных скоростях скольжения и нагрузках.

Mechanical and tribotechnical properties of UHMWPE-based polymer-polymeric composites have been investigated in order to develop extrudable, wear-resistant, solid-lubricant polymer composites for additive manufacturing with a view of their further application as feedstocks for 3D printing (FDM). Mixtures of UHMWPE with graft and block-copolymers of low-density polyethylene (HDPE-g-VTMS, HDPE-g-SMA, HDPE-b-EVA), polypropylene powder, block-copolymers based on polypropylene and polyamide with linear low density polyethylene (PP-b-LLDPE, PA-b-LLDPE) as well as chemically cross-linked polyethylene (PEX-b) were the matter of research. The study of the above polymer components for the ultrahigh molecular weight matrix was motivated by increasing processability (extrudability) of UHMWPE by loading commercially available and effective fillers. The ultimate aim of the paper was development of wear-resistant polymer composites for 3D manufacturing of high strength and wear-resistance parts of complex shape for tribounits in mechanical engineering and medicine. The extrudability and wear resistance of UHMWPE based polymer-polymeric composites under dry friction at various sliding speeds and loads have been studied.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, блок-сополимер, привитой сополимер, износостойкость, надмолекулярная структура, аддитивные технологии.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, block-copolymer, graft-copolymer, polypropylene, wear resistance, permolecular structure, additive manufacturing.

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), обладая приемлемой прочностью, низким коэффициентом трения, высокой износо- и химической стойкостью в агрессивных средах, используется для изготовления узлов трения машин и механизмов, а также широко применяется в медицине в качестве деталей и узлов ортопедических имплантатов [1—3]. Из-за большой длины полимерных цепей СВМПЭ имеет крайне низкий показатель текучести расплава (ПТР = 0,06 г/10 мин), что существенно затрудняет его переработку традиционными для конструкционных пласти-

* Работа выполнена в рамках плана фундаментальных научных исследований государственных академий наук 2013—2020 гг., проекта РФФИ 16-48-700192_р_а "Научные основы создания многоуровневых твердосмазочных, экструдируемых, антифрикционных композитов на базе перспективных термопластичных полимеров для медицины и машиностроения".

sb118.indd 16 10.01.2018 9:29:03

ков методами (литье под давлением, шнековая экструзия и др.).

Повысить технологичность (экструдируемость) композитов на основе высокомолекулярной матрицы, в частности СВМПЭ, можно за счет увеличения показателя текучести расплава добавлением в высокомолекулярную матрицу полипропилена (ПП) с более высоким ПТР = 0,6 г/10 мин [4—6]. Однако ПП, не имея термодинамического сродства к СВМПЭ, обладает крайне низкой адгезией к нему. Поэтому ПП, повышая текучесть расплава (технологичность порошковой композиции), резко снижает физико-механические свойства (предел текучести и прочности, величину удлинения до разрушения) образцов смесей СВМПЭ с ПП.

В целях разработки экструдируемых композитов для применения в 3D-технологиях получения деталей узлов трения сложной формы в машиностроении и медицине исследованы текучесть и трибомеханические характеристики полимер-полимерных композиций СВМПЭ с привитыми и блок-сополимерами полиэтилена (ПЭ) высокой плотности (HDPE-g-VTMS, HDPE-g-SMA, HDPE-b-EVA), с блок-сополимерами полипропилена и полиамида с линейным ПЭ низкой плотности (PP-b-LLDPE, PA-b-LLDPE), а также сшитым ПЭ (PEX-b) для последующего создания на их основе композитов с кратно увеличенной износостойкостью и удовлетворительной текучестью расплава [7—10]. Использование экструдируемых композитов на основе СВМПЭ в аддитивных технологиях позволит расширить номенклатуру высокопрочных и износостойких изделий сложной формы, в том числе для узлов трения машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях эксплуатации [11].

Подход, основанный на усилении модифицирующих эффектов за счет образования более прочных связей на границе раздела фаз полимер—полимер, является эффективным и перспективным на пути расширения перечня доступных износостойких экструдируемых полимерных материалов для успешного их использования в аддитивных технологиях.

Исследованы текучесть и износостойкость полимер-полимерных композиций на основе СВМПЭ с оптимальным содержанием процессинговых наполнителей в условиях сухого трения при различных скоростях скольжения и нагрузках в целях выбора наиболее эффективных модификаторов и условий эксплуатации, для разрабатываемых на их основе экструдируемых, высокопрочных, износостойких композитов.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Использовали порошки СВМПЭ фирмы Ticona (GUR-2122) молекулярной массой $4{,}0 \cdot 10^6$ г/моль, сшитого ПЭ PEX-b (силановая сшивка, ГК "Олента"), блок-сополимеры ПП PP-b-LLDPE, полиамида PA-b-LLDPE ("Эталитен", молотый гранулят; размер частиц 100...200 мкм), привитыми сополимерами этилена высокой плотности HDPE-g-VTMS, HDPE-g-SMA, ("Олентен" молотый гранулят; размер частиц 100...300 мкм) HDPE-b-EVA ("Эталитен", молотый гранулят; размер частиц 100...300 мкм) и ПП марки 21007 (размер частиц 80...200 мкм, ООО "Томскнефтехим). Объемные образцы полимер-полимерных композитов получали горячим прессованием на прессе МС-500 в пресс-форме, обогреваемой кольцевой разъемной печью при давлении 10 МПа и температуре 200 °С со скоростью последующего охлаждения 3...4 °С/мин. Перемешивание порошков полимерного связующего СВМПЭ и наполнителей проводили в планетарной шаровой мельнице МП 4/0,5 с предварительным диспергированием взвеси компонентов в этиловом спирте в ультразвуковой ванне.

Экструзию смесей для оценки удельного давления экструдирования проводили на плунжерном (поршневом) лабораторном экструдере UE-MSL (Великобритания) с диаметром выходной фильеры 4 мм.

Износостойкость образцов в режиме сухого трения определяли по схеме "вал—колодка" при нагрузках на образец, закрепленный в держателе, 60 и 140 Н и скоростях скольжения 0,3 и 0,5 м/с на машине трения СМТ-1 в соответствии с ASTM G99/DIN 50324. Габаритные размеры образцов 15,8×6,4×10,0 мм^3. Диаметр контртела, выполненного из стали ШХ15, 35 мм. Износ определяли по глубине дорожки трения с помощью контактного профилометра Alpha-Step IQ (KLA-Tencor).

Степень кристалличности оценивали на совмещенном анализаторе SDT Q600. ИК-спектры получали на спектрометре NIKOLET 5700. Структурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 при ускоряющем напряжении 20 кВ по поверхностям скола, полученным механическим разрушением образцов с надрезом, предварительно выдержанных в жидком азоте.

В таблице приведены физико-механические свойства образцов полимерных смесей СВМПЭ с наполнителями оптимального содержания по

sb118.indd 17 10.01.2018 9:29:03

Физико-механические свойства СВМПЭ и полимер-полимерных композиций на его основе

Массовая доля наполнителя, %	Плотность ρ, г/см^3	Твердость по Шору *D*	Модуль упругости *E*, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Удлинение ε, %	Режим экструдирования, °С/МПа	Условный ПТР, г/10 мин
СВМПЭ	0,928	55,6 ± 0,2	405 ± 17	22,1 ± 0,4	36 ± 1,6	482 ± 6	205/5,52	0,1262
СВМПЭ + 10 % HDPE-g-VTMS	0,924	57,6 ± 0,5	398 ± 9	22,5 ± 0,9	29,0 ± 1,3	416 ± 57	205/5,52	0,2912
СВМПЭ + 10 % HDPE-g-SMA	0,941	58,9 ± 0,4	441±22	21,4±0,7	30,1±2,2	440±40	205/5,1	0,4351
СВМПЭ + 5 % HDPE-b-EVA	0,928	56,8 ± 0,7	267 ± 20	19,6 ± 0,8	23,3 ± 1,9	313 ± 17	205/5,52	—
СВМПЭ + 10%PEX-b	0,931	57,4 ± 0,5	354 ± 39	22,8 ± 0,8	31,2 ± 2,9	429 ± 38	205/4,69	1,1219
СВМПЭ + 10 %PP	0,923	56,0 ± 0,6	315 ± 45	20,8 ± 1,4	20,0 ± 0,6	173 ± 35	205/4,22	2,5972
СВМПЭ + 5 %PP-b-LLDPE	0,916	56,1 ± 0,5	403 ± 25	21,1 ± 0,5	29,4 ± 1,6	383 ± 28	205/4,34	3,5736
СВМПЭ + 5 %PA-b-LLDPE	0,924	57,6 ± 0,6	386 ± 42	21,9 ± 0,3	33,6 ± 0,9	437 ± 15	205/5,52	0,1178

уровню экструдируемости (пропорциональному ПТР) и минимальному снижению механических характеристик смесей (пределу текучести $\sigma_{0,2}$, пределу прочности $\sigma_в$, удлинению до разрушения ε) [7—10]. Оптимальная массовая доля наполнителя находится в пределах 5...10 %. По этой причине для исследования влияния скорости скольжения и нагрузки на износостойкость образцов полимерных смесей выбраны именно оптимальные составы полимерных смесей.

На рис. 1 представлены надмолекулярные структуры, характерные для СВМПЭ (рис. 1, *а*) и всех исследованных полимерных смесей с массовой долей наполнителя до 10 % (рис. 1, *б—г*). При большем наполнении матрицы сферолитная структура не формируется, а степень кристалличности полимер-полимер-

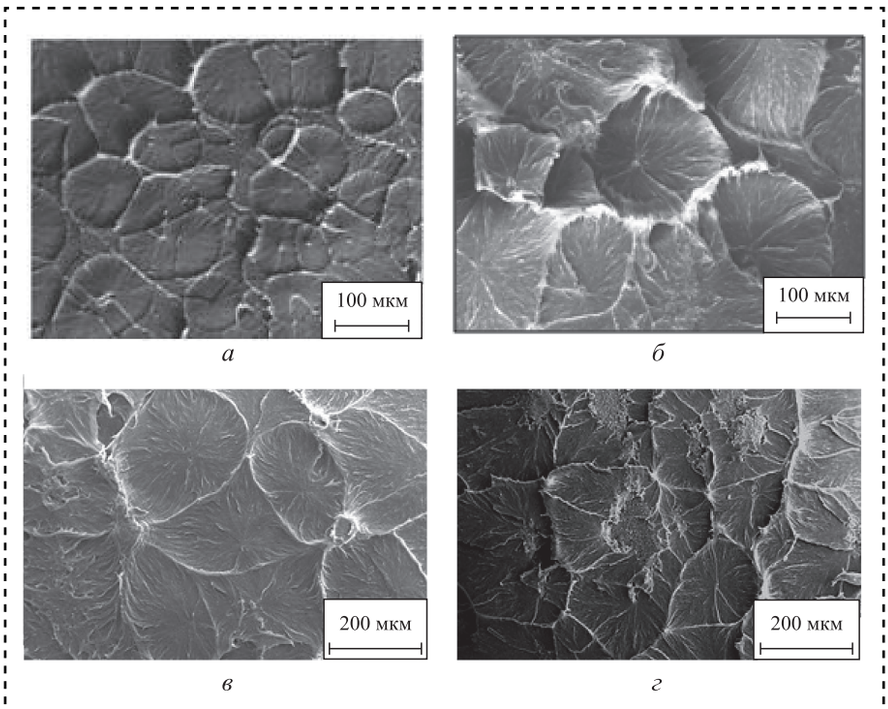


Рис. 1. Микрофотографии надмолекулярной структуры СВМПЭ (*а*) и смесей СВМПЭ + 10 % HDPE-g-VTMS (*б*), СВМПЭ + 10 % PEX-b (*в*), СВМПЭ + 5 % PP-b-LLDPE (*г*)

sb118.indd 18 10.01.2018 9:29:03

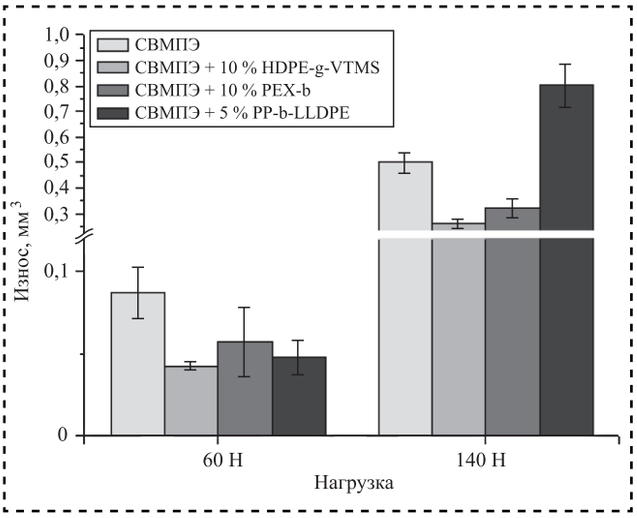


Рис. 2. Объемный износ СВМПЭ и композиций СВМПЭ + 10 % HDPE-g-VTMS, СВМПЭ + 10 % PEX-b, СВМПЭ + 5 % PP-b-LLDPE в условиях сухого трения скольжения при скорости 0,3 м/с после испытаний в течение 1 ч

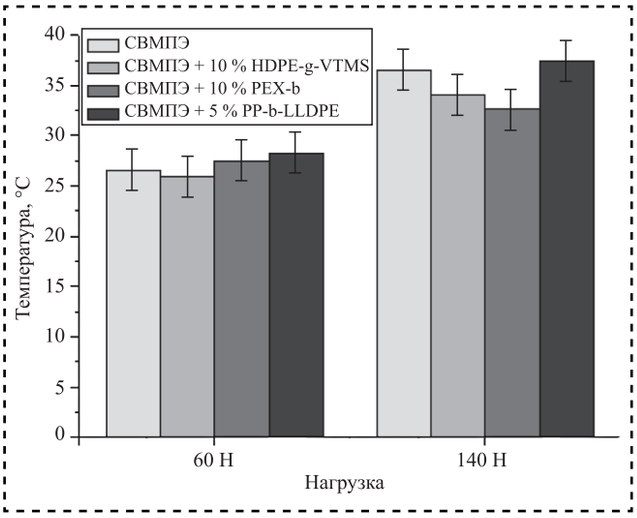


Рис. 3. Температура на поверхности трения при сухом трении скольжения образцов СВМПЭ и композиций СВМПЭ + 10 % HDPE-g-VTMS, СВМПЭ + 10 % PEX-b, СВМПЭ + 5 % PP-b-LLDPE при скорости скольжения 0,3 м/с после испытаний в течение 1 ч

ной композиции существенно снижается [7, 8]. При этом механические характеристики также значительно уменьшаются (предел текучести, предел прочности, удлинение до разрушения). Критерий выбора полимерного процессингового модификатора для СВМПЭ — удовлетворительная текучесть смеси при максимальном сохранении прочностных характеристик. Полипропилен, обладая высоким ПТР = 0,6 г/10 мин, но не имея термодинамического сродства к СВМПЭ, значительно снижает прочностные свойства матрицы из-за отсутствия адгезии. Блок-сополимер на основе ПП и линейного ПЭ низкой плотности (PP-b-LLDPE) обеспечивает адгезию с СВМПЭ и максимально сохраняет прочностные характеристики матрицы (см. таблицу).

Анализ ИК-спектров композиций СВМПЭ с блок-сополимерами PP-b-LLDPE и PA-b-LLDPE показал, что в спектрах полимер-полимерных композитов возросла интенсивность пиков 1240 см$^{-1}$ (C—O—C), 1040 см$^{-1}$ (C—C—O), 1620 см$^{-1}$ (C=C) и 1700 см$^{-1}$ (C=O), что свидетельствует в пользу формирования связи между СВМПЭ и блок-сополимерами [8]. Путем добавления блок-сополимера, содержащего линейный ПЭ низкой плотности, удалось механически и химически "связать" наполнители, содержащие ПП и полиамид, с СВМПЭ-матрицей. В результате повысилась текучесть (экструдируемость) и минимальным образом снизились механические характеристики (в условиях появления адгезии СВМПЭ с процессинговым наполнителем).

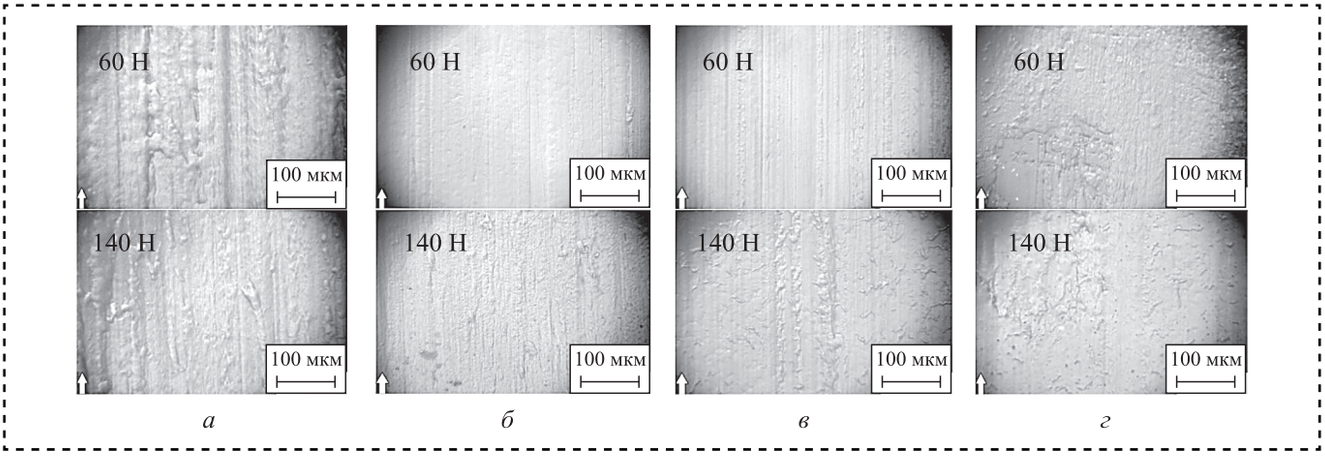


Рис. 4. Микрофотографии поверхностей износа СВМПЭ (*а*) и композиций СВМПЭ + 10 % HDPE-g-VTMS (*б*), СВМПЭ + 10 % PEX-b (*в*), СВМПЭ + 5 % PP-b-LLDPE (*г*) в режиме сухого трения скольжения при скорости 0,3 м/с после испытаний в течение 1 ч

sb118.indd 19 10.01.2018 9:29:04

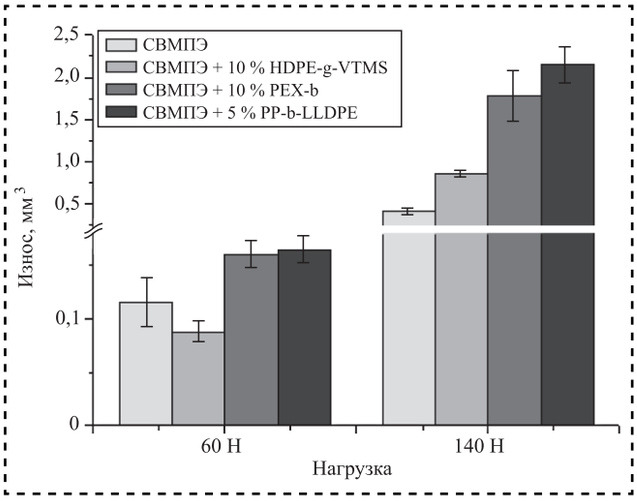


Рис. 5. Объемный износ при сухом трении СВМПЭ и композиций СВМПЭ + 10 % HDPE-g-VTMS, СВМПЭ + 10 % PEX-b, СВМПЭ + 5 % PP-b-LLDPE при скорости скольжения 0,5 м/с после испытаний в течение 1 ч

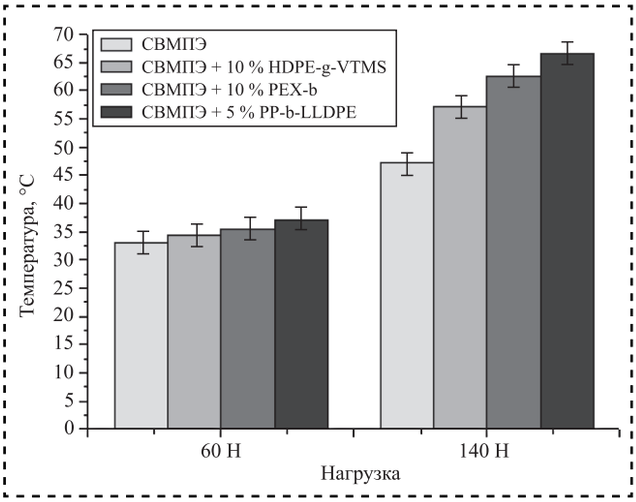


Рис. 6. Температура на поверхности при сухом трении СВМПЭ и композиций СВМПЭ + 10 % HDPE-g-VTMS, СВМПЭ + 10 % PEX-b, СВМПЭ + 5 % PP-b-LLDPE при скорости скольжения 0,5 м/с после испытаний в течение 1 ч

Смесь СВМПЭ с блок-сополимером (HDPE-b-EVA) массовой долей 5 % имеет низкие прочностные характеристики по сравнению с СВМПЭ и низкую текучесть расплава. По этой причине она не перспективна в качестве экструдируемой матрицы для дальнейшей разработки на ее основе высокопрочных твердосмазочных композитов.

С позиций сохранения механических свойств и удовлетворительной текучести эффективными являются блок-сополимеры ПП с линейным ПЭ низкой плотности и сшитый ПЭ PEX-b (см. таблицу).

Далее исследовали полимерные смеси на основе СВМПЭ на износостойкость при скоростях скольжения 0,3 и 0,5 м/с и нагрузках 60 и 140 Н.

При нагрузке 60 Н износ уменьшился до 2 раз при добавлении 10 % HDPE-g-VTMS, в 1,6 раз при добавлении 10 %PEX-b и в 2 раза в случае 5 % PP-b-LLDPE по сравнению с чистым СВМПЭ (рис. 2). При более высокой нагрузке 140 Н происходит снижение износостойкости (до 2 раз) как чистого СВМПЭ, так и смесей на его основе (более чем в 3 раза).

На рис. 3 представлено изменение температуры поверхности трения образцов СВМПЭ и смесей на его основе при скорости скольжения 0,3 м/с. При нагрузке на образец 60 Н температура на поверхности трения составляет 25...27 °С для СВМПЭ и образцов всех исследованных смесей; при большей нагрузке (140 Н) для всех композиций температура на поверхности повышается в пределах 10 °С.

Топография поверхности износа образцов полимерных смесей при скорости скольжения 0,3 м/с

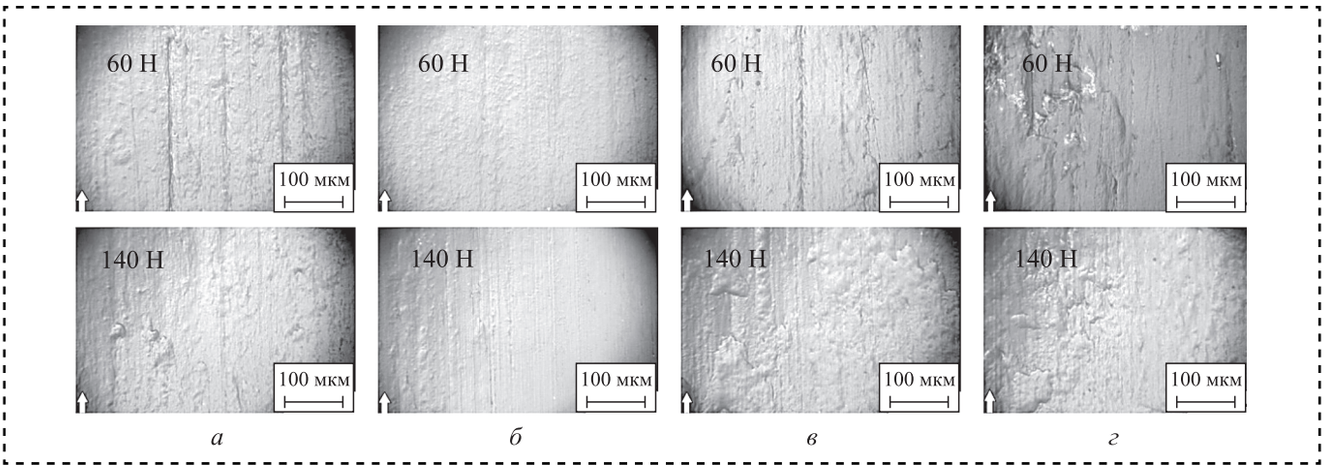


Рис. 7. Поверхности трения СВМПЭ (*а*) и композиций СВМПЭ + 10 % HDPE-g-VTMS (*б*), СВМПЭ 10 % PEX-b (*в*), СВМПЭ + 5 % PP-b-LLDPE (*г*) в режиме сухого трения скольжения при скорости 0,5 м/с после испытаний в течение 1 ч

sb118.indd 20 10.01.2018 9:29:06

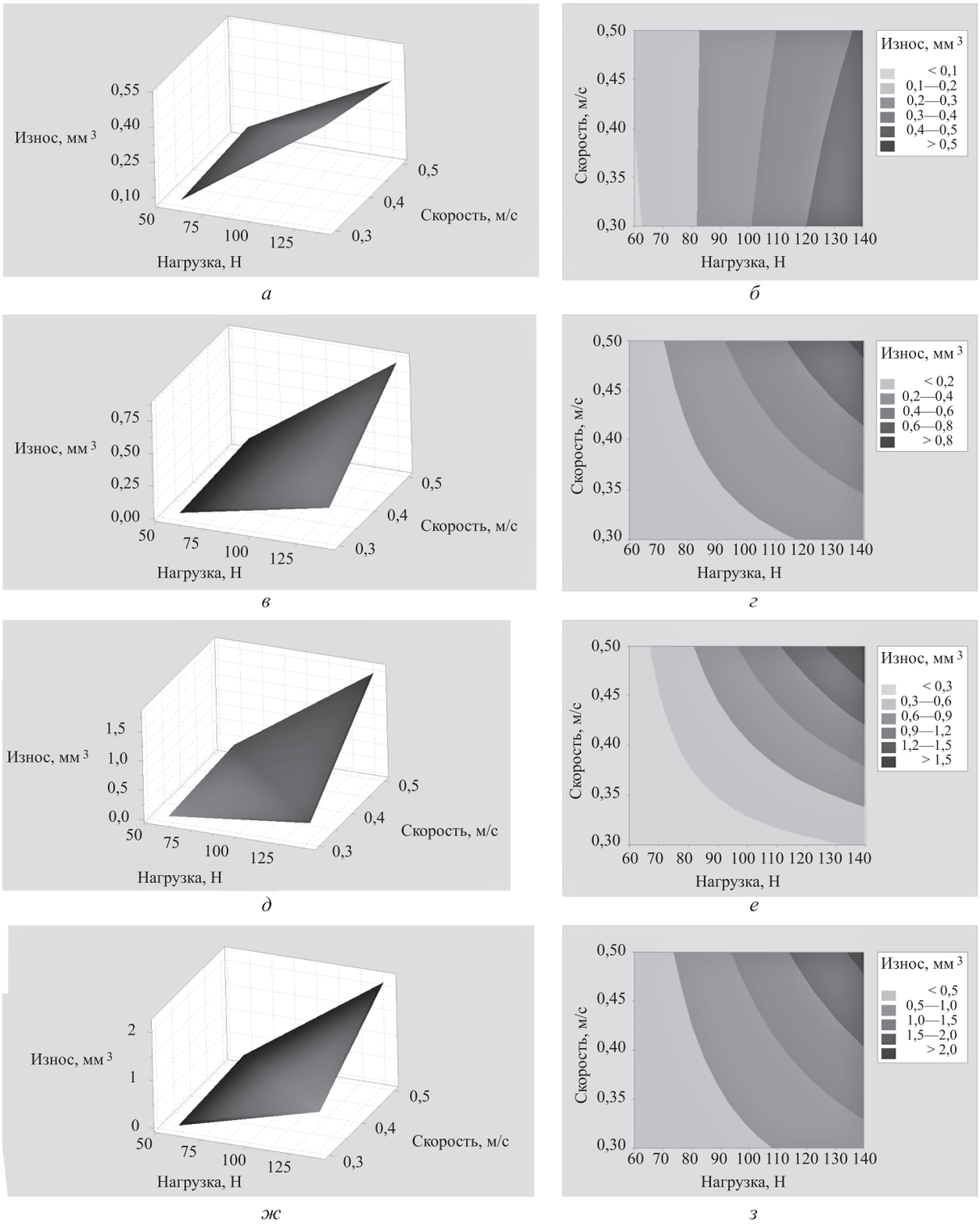


Рис. 8. Поверхности (*а*, *в*, *д*, *ж*) и соответствующие им контурные графики (*б*, *г*, *е*, *з*), характеризующие связь входных переменных (скорости и нагрузки) на износ СВМПЭ (*а*, *б*), СВМПЭ + 10 % HDPE-g-VTMS (*в*, *г*), СВМПЭ + 10 % PEX-b (*д*, *е*), СВМПЭ + 5 % PP-b-LLDPE (*ж*, *з*)

sb118.indd 21 10.01.2018 9:29:06

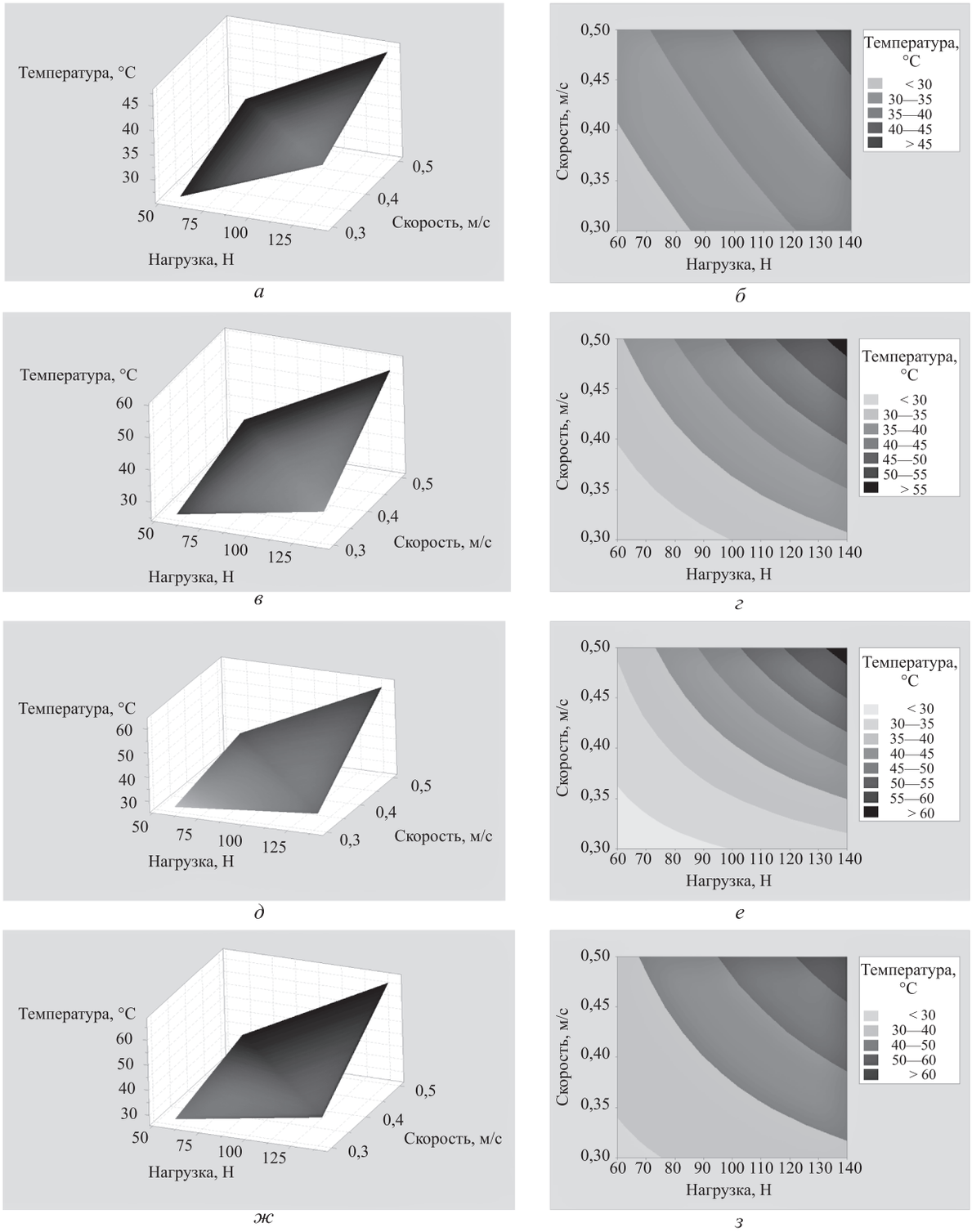


Рис. 9. Поверхности (*а*, *в*, *д*, *ж*) и соответствующие им контурные графики (*б*, *г*, *е*, *з*), характеризующие связь входных переменных (нагрузка, скорость) на температуру поверхности трения СВМПЭ (*а*, *б*) СВМПЭ + 10 % HDPE-g-VTMS (*в*, *г*), СВМПЭ + 10 % PEX-b (*д*, *е*), СВМПЭ + 5 % PP-b-LLDPE (*ж*, *з*)

sb118.indd 22 10.01.2018 9:29:09

при различных нагрузках, сформировавшаяся на поверхности трения, коррелирует с зависимостью износа от нагрузки: большая износостойкость соответствует более гладкой поверхности дорожки трения (рис. 4).

Износ полимерных смесей при скорости 0,5 м/с и нагрузке на образец 60 Н возрастает по сравнению с чистым СВМПЭ (рис. 5). При скорости 0,5 м/с и нагрузке 140 Н происходит кратное повышение объемного износа СВМПЭ и всех композиций на его основе (до 5—10 раз). При этом температура на поверхности трения на стадии установившегося изнашивания (после испытаний в течение 1 ч) возрастает до 47 °С для чистого СВМПЭ и до 67 °С для смесей на его основе (рис. 6). Следствием повышения температуры на поверхности трения при высокой скорости скольжения и высокой нагрузке является увеличенный износ (рис. 7). При высоких параметрах нагружения образцов наблюдается повышенная шероховатость поверхности и большое количество продуктов износа (см. рис. 5).

С помощью программного обеспечения Minitab 17 построены поверхности износа и соответствующие им контурные графики (рис. 8 и 9), характеризующие связь "входных переменных" (нагрузка, скорость) на сопротивление изнашиванию и температуру на поверхности трения образцов СВМПЭ и композиций СВМПЭ + 10 % HDPE-g-VTMS, СВМПЭ + 10 %PEX-b, СВМПЭ + 5 % PP-b-LLDPE. Представленные данные позволяют наглядно проследить влияние скорости скольжения и нагрузки на износ в режиме сухого трения скольжения.

Заключение

Исследованы физико-механические и триботехнические свойства полимер-полимерных композиций на основе СВМПЭ при различных скоростях скольжения (0,3 и 0,5 м/с) и нагрузках (60 и 140 Н) в условиях сухого трения скольжения.

Показано, что промышленно выпускаемые, совместимые с СВМПЭ сополимеры (HDPE-g-VTMS, HDPE-g-SMA, PEX-b, PP-b-LLDPE) обеспечивают минимальное снижение механических свойств полимерных смесей при сохранении сферолитной надмолекулярной структуры при массовой доле наполнителя 5...10 %. При этом показатель текучести полимер-полимерной смеси определяется природой наполнителя.

Износостойкость полимер-полимерных композиций на основе СВМПЭ возрастает в 1,6—2,5 раза при умеренной скорости и нагрузке (0,3 м/с и 60 Н) по сравнению с чистым СВМПЭ. При увеличении скорости до 0,5 м/с и нагрузки до 140 Н износостойкость полимерных смесей резко снижается и становится ниже, чем у исходного СВМПЭ. По этой причине экструдируемые полимерные композиты на основе СВМПЭ могут быть рекомендованы для работы в условиях умеренных скоростей и нагрузок.

Показано, что наиболее эффективными наполнителями в равной степени являются блок-сополимер PP-b-LLDPE и химически сшитый PEX-b, введением которых в сверхвысокомолекулярную неполярную матрицу удалось достигнуть высокой текучести расплава смеси при сохранении прочностных характеристик матрицы горячепрессованного материала на уровне таковых для чистого СВМПЭ.

Экструдируемые полимер-полимерные композиции на основе сверхвысокомолекулярной матрицы СВМПЭ могут быть использованы в аддитивных технологиях для получения антифрикционных изделий в узлах трения в машиностроении и медицине, прежде всего методом FDM (экструзионной послойной печати).

Библиографический список

1. **Brian J. Briscoe, Sujeet K. Sinha.** Tribological applications of polymers and composites: Past, present and future prospects // Elsevier. 2008. P. 1—14.
2. **Steven M. Kurtz.** The UHMWPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement // Academic press. 2004. 379 p.
3. **Galetz M.C., Blar T., Ruckdaschel H., Sandler K.W., Alstadt V.** Carbon Nanofibre-Reinforced Ultrahigh Molecular Weiht Polyethylene for Tribological Applications, Jornal of Applied Polymer Science. 2007. N. 104. P. 4173—4181.
4. **Eon Mi Lee, Young Se Oh, Hyun Soo Ha, Byung Kyu Kim.** Rheological properties of UHMWPE/iPP blends // Polym. Adv. Technol, 2009. N. 20. P. 1121—1126.
5. **Gongde Liu, Ming Xiang, Huilin Li.** A Study on Sliding Wear of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene / Polypropylene Blends // Polymer Engineering and Science. 2004. N. 44 (1). P. 197—208.
6. **Navin Chang, Naik A.M., Khaira H.K.** Development of UHMWPE Modified PP/PET Blends and Their Mechanical and Abrasive Wear Behavior // Polimer Composites. 2007. N. 5. P. 267—272.
7. **Khalil Yas, Kowalski Adam, Hopkinson Neil.** Influence of laser power on tensile properties and material characteristics of laser-sintered UHMWPE // Manufacturing Rev. 2016. N. 3 (15). P. 1—9.
8. **Прут Э.В., Зеленецкий А.Н.** Химическая модификация и смешение полимеров в экструдере-реакторе // Успехи химии. 2001. № 1 (70). С. 72—87.
9. **Поведение** при трении смесей несовместимых полимеров сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полиметилметакрилата, полученных в среде сверхкритического диоксида углерода / А.П. Краснов и др. // Трение и износ. 2007. № 3 (28). С. 288—295.
10. **Сравнительный** анализ влияния нано- и микронаполнителей окисленного Al на фрикционно-механические свойства СВМПЭ / С.В. Панин и др. // Трение и износ. 2010. № 5 (31). С. 353—360.
11. **Механические** и триботехнические характеристики нано- и микрокомпозитов на основе полимер-полимерной матрицы СВМПЭ-ПТФЭ / С.В. Панин и др. // Трение и износ. 2015. № 6 (36). С. 652—661.

sb118.indd 23 10.01.2018 9:29:10

УДК 629.4.027.115

А.В. Бородин, *д-р техн. наук*
(Омский государственный университет путей сообщения)
E-mail: tmdm@omgups.ru

Усовершенствование буксы грузового вагона с цилиндрическим роликоподшипником

Представлены конструктивные варианты буксы грузового вагона с раздельным восприятием нагрузки: радиальной — цилиндрическими поверхностями роликов, осевой — шаровым подпятником.

Presented design options for axle boxes of wagon with separate perception of load: radial — cylindrical surfaces of the rollers, axial — ball thrust bearing.

Ключевые слова: букса, роликовый подшипник, шаровой подпятник, сепаратор, шейка оси.

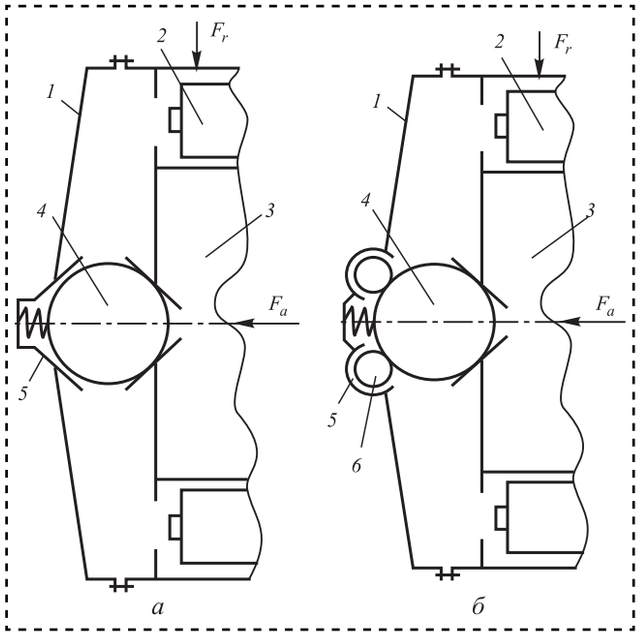
Keywords: axle box, roller bearing, ball bearing, separator, axle neck.

В типовой буксе грузового вагона восприятие боковых (рамных) нагрузок происходит при контакте торцов цилиндрических роликов с бортами колец. Порождаемый опрокидывающий момент изменяет давление по длине образующей ролика, разрушает масляную пленку и приводит к взаимодействию металлических поверхностей. Эти и другие конструктивные особенности вызывают повышенное нагревание букс, снижают их ресурс.

Повышение работоспособности буксового узла грузовых вагонов связывают с внедрением двухрядного конического (кассетного) подшипника, применяемого в ряде стран с развитой железнодорожной сетью. Конструкция кассетного подшипника сохраняет две внутренние обоймы с посадочными натягами, а введение конических роликов с небольшой конусностью не исключает отказов вследствие горизонтальной поперечной нагрузки. Испытания грузовых вагонов с кассетными подшипниками (по указаниям ОАО "РЖД") показали, что средний уровень нагрева букс с коническими подшипниками в 1,6...2,0 раза выше, чем в типовых буксах, а основные неисправности аналогичны неисправностям букс с цилиндрическими подшипниками.

Усовершенствование буксы грузового вагона основано на устранении в типовой буксе одновременного восприятия роликами подшипников радиальной и боковой (рамной) нагрузок. В буксу вводится шаровой подпятник, исключающий восприятие боковой нагрузки бортами колец цилиндрических подшипников (рисунок).

Конструкция буксы с осевой опорой вписывается в габаритные размеры типового корпуса буксы без изменения конструкции оси. Ресурс подшипников модернизированной буксы не определяется горизонтальной поперечной на-



Принципиальная схема буксы с раздельным восприятием составляющих динамической нагрузки:
а — осевая опора с трением скольжения; *б* — осевая опора с трением качения; *1* — корпус; *2* — цилиндрический роликовый подшипник; *3* — шейка оси; *4* — шаровой подпятник; *5* — опора; *6* — шарик

sb118.indd 24 10.01.2018 9:29:10

грузкой, а зависит только от радиальной, для восприятия которой и предназначен этот тип подшипников. Конструкция буксы с осевой опорой защищена блоком изобретений.

Букса с роликовыми подшипниками [1]. В буксовой шейке концентрично оси выполнено ступенчатое отверстие, в котором размещены с зазором по наружному диаметру опора буксовой шейки и подпружиненный упор, а между опорой шайбы и опорой буксовой шейки установлено тело вращения, например, шар, контактирующее с опорой шайбы и торцевой поверхностью упора.

Букса с цилиндрическими роликоподшипниками [2]. Букса снабжена телами вращения, например, сферами (шариками), размещенными в сепараторе в виде сферического сектора и контактирующими с коническими поверхностями осевой опоры и поверхностью шара (подпятника), при этом сепаратор снабжен упорами, торцевые поверхности которых взаимодействуют с торцевой поверхностью осевой опоры и поверхностью шара (подпятника).

Букса с цилиндрическим роликоподшипником и шаровым подпятником [3]. Букса снабжена шайбами в упругодеформируемом корпусе, размещенными попарно с торцов подшипника, пластичным смазочным материалом в полостях между уплотнительными кромками шайб и подпружиненными вдоль оси фланцевыми втулками, установленными снаружи шарового подпятника и взаимодействующими между собой радиальными поверхностями, а фланцами — с торцовыми поверхностями осевой опоры и оси, при этом одна из втулок, например, контактирующая фланцем с осевой опорой, выполнена из антифрикционного материала.

Букса с роликовыми подшипниками и осевой шаровой опорой [4]. Букса снабжена дополнительной осевой опорой между опорной поверхностью оси и торцевой поверхностью пяты, на торцевых поверхностях пяты и дополнительной опоры выполнены кольцевые канавки, в которых размещены тела вращения, например шарики, которые установлены в сепараторе из самосмазывающегося материала.

Букса с цилиндрическим роликоподшипником [5]. Наружное кольцо подшипника выполнено в виде втулки без бортов с приставными опорными и направляющими кольцами, а сепаратор подшипника содержит центрирующий поясок, контактирующий с внутренней поверхностью кольца, при этом торцевые поверхности пояска сепаратора и направляющих колец определяют симметричное расположение роликов подшипника относительно торцов кольца.

Букса с цилиндрическим роликоподшипником [6]. Букса выполнена с двухрядным радиальным подшипником с короткими цилиндрическими роликами, включающим наружное кольцо в виде втулки с двумя опорными цилиндрическими дорожками и бортами, определяющими осевое расположение роликов, внутреннее кольцо в виде втулки без бортов и сепаратор в виде втулки с окнами для каждого ряда роликов, при этом окна в каждом ряду смещены на расстояние, равное половине радиального шага окон.

Подшипник со сферическими упорными поверхностями [7]. Между торцовыми поверхностями пяты и вала размещена регулировочная шайба, упор с конической поверхностью, взаимодействующий с подпятником, при этом сферическая поверхность подпятника контактирует с втулкой, содержащей фланец и упругий элемент, а торцовые поверхности втулки взаимодействуют с торцовыми поверхностями вала и корпуса осевой опоры.

Сепаратор роликоподшипника буксы подвижного состава [8]. Сепаратор состоит из сегментов, размещенных между соседними роликами подшипника, корпус каждого сегмента содержит гнезда для сепарирующих роликов и упругие элементы, расположенные симметрично цилиндрической поверхности, проходящей через центры осей роликов, при этом опорные поверхности упругих элементов взаимодействуют с цилиндрическими поверхностями роликов, между упругими элементами сегментов и роликами подшипника образованы карманы для смазочного материала, а в гнездах корпуса каждого сегмента размещены сепарирующие ролики.

Сепаратор роликоподшипника буксы подвижного состава [9]. Корпус каждого сегмента состоит из секций и размещенных между ними упругих элементов, в каждой секции выполнены гнезда, расположенные оппозитно цилиндрической поверхности, проходящей через центры осей роликов, в гнездах размещены сепарирующие тела качения — шарики, при этом каждый шарик контактирует с наружной поверхностью гнезда и цилиндрическими поверхностями роликов.

Подшипник со сферическими упорными поверхностями [10]. Сферический подпятник выполнен составным из двух полусфер с радиусными канавками на торцевых поверхностях полусферы, в канавках в сепараторе размещены сферические тела качения (шарики), геометрические центры которых находятся в плоскости, проходящей через центр сферического подпятника и перпендикулярной оси вала, при этом радиальное положение торцевой поверхности

sb118.indd 25 10.01.2018 9:29:11

полусферы, контактирующей с пятой, обеспечивает цилиндрический штифт, установленный неподвижно в конусе пяты по оси вала и с зазором в отверстии полусферы подпятника.

Конструкция буксы грузового вагона усовершенствована введением в буксу шарового подпятника, воспринимающего осевые нагрузки сферической поверхностью или шариками в специальном сепараторе [1, 2]. Второй вариант значительно снижает силы трения в буксе.

Конструкция с шаровым подпятником создает более равномерное нагружение по рядам роликов, снижает краевые давления на кольца подшипников [3—6]. Повышение нагрузочной способности и быстроходности обеспечивается лучшим сепарированием роликов и герметизацией буксы [7—10].

Библиографический список

1. **Пат. 2094274 РФ, МПК^8 6B61F15/12.** Букса с роликовыми подшипниками / Бородин А.В., Лисовский А.С., Ковалева Н.В.; патентообладатель ГОУ ВПО ОмГУПС; заявл. 03.04.1995, опубл. 27.10.1997. Бюл. № 1.
2. **Пат. 230098865 РФ, МПК^8 B61F15/12.** Букса с цилиндрическими роликоподшипниками / Бородин А.В.; патентообладатель ГОУ ВПО ОмГУПС; заявл. 26.04.2006, опубл. 10.11.2007. Бюл. № 27.
3. **Пат. 65007 РФ, МПК^8 B61F15/12.** Букса с цилиндрическим роликоподшипником и шаровым подпятником / Бородин А.В., Иванова Ю.А., Здор Г.П.; патентообладатель ГОУ ВПО ОмГУПС; заявл. 31.01.2007, опубл. 27.07.2007. Бюл. № 21.
4. **Пат. 62568 РФ, МКП^8 B61F15/12.** Букса с роликовыми подшипниками и осевой шаровой опорой / Бородин А.В., Иванова Ю.А.; патентообладатель ГОУ ВПО ОмГУПС; заявл. 11.12.2006, опубл. 27.04.2007. Бюл. № 12.
5. **Пат. 65008 РФ, МКП^8 B61F15/12.** Букса с цилиндрическим роликоподшипником / Бородин А.В., Иванова Ю.А.; патентообладатель ГОУ ВПО ОмГУПС; заявл. 19.11.2008, опубл. 10.04.2009. Бюл. № 10.
6. **Пат. 58094 РФ, МКП^8 B61F15/12.** Букса с цилиндрическим роликоподшипником / Бородин АВ., Клюка В.П., Иванова Ю.А.; патентообладатель ГОУ ВПО ОмГУПС; заявл. 11.05.2006, опубл. 10.11.2006. Бюл. № 31.
7. **Пат. 82011 РФ, МПК^8 F16C17/04.** Подшипник со сферическими упорными поверхностями / Бородин А.В., Иванова Ю.А.; патентообладатель ГОУ ВПО ОмГУПС; заявл. 19.11.2008, опубл. 10.04.2009. Бюл. № 10.
8. **Пат. 2403464 РФ, МПК^8 F16C19/22.** Сепаратор роликоподшипника буксы подвижного состава / Бородин А.В.; патентообладатель ГОУ ВПО ОмГУПС; заявл. 15.06.2009, опубл. 10.11.2010. Бюл. № 31.
9. **Пат. на полезную модель 106694 РФ, МПК^8 F16C33/46.** Сепаратор роликоподшипника буксы подвижного состава / Бородин А.В., Ковалев М.И.; патентообладатель ГОУ ВПО ОмГУПС; опубл. 20.07.2011.
10. **Пат. на полезную модель 116581 РФ, МПК^8 F16C17/04.** Подшипник со сферическими упорными поверхностями / Бородин А.В., Иванова Ю.А.; патентообладатель ГОУ ВПО ОмГУПС; опубл. 27.05.2012.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

☑ *За наличный и безналичный расчет.*
☑ *С любого номера и на любой срок.*
☑ *Без почтовых наценок.*

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Тел.: 8 (495) 785-60-69
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

sb118.indd 26 10.01.2018 9:29:11

УДК 629.4:621.891+06

И.А. Майба, *д-р техн. наук,* **Д.В. Глазунов,** *канд. техн. наук*
(Ростовский государственный университет путей сообщения)
E-mail: gdv_cmko@rgups.ru

Способы регулирования коэффициента сцепления в контакте "колесо—рельс"

Рассмотрены способы регулирования коэффициента сцепления в контакте "колесо—рельс" в целях разработки эффективных активаторов и модификаторов трения, регулирующих трение на поверхности катания колес с рельсами. Установлено, что в реальных условиях эксплуатации коэффициент сцепления ψ в контакте колеса локомотива с рельсом меняется от 0,06 до 0,15 при наличии лубрикантов в зоне сцепления, до 0,33...0,35 при сухом контакте с песком и до 0,38...0,60 при применении активаторов трения. При таком разбросе значений фактических коэффициентов сцепления и трения устанавливать фиксированные значения коэффициентов трения для активаторов трения на этапе их разработки нецелесообразно, так как это ограничит их применение по формальному признаку.

The ways of regulation of the friction coefficient in the contact "wheel—rail" with the development of efficient activators and modifiers of friction, friction control on the running surface of wheels and rails. It is established that in real conditions the adhesion coefficient ψ in the contact of the wheels of the locomotive and the rail varies from 0.06 to 0,15 in the presence of lubricants in the area of adhesion up to 0.33...0.35 in dry contact with the sand and up to 0.38 to 0.60 when applying the activators of friction. With such a range of values of the actual coefficients of adhesion and friction to set the fixed values of the coefficients of friction for the friction of the actuators at the stage of their development is not advisable, as it will limit their application on formal grounds.

Ключевые слова: коэффициент сцепления, контакт "колесо—рельс", активатор трения, подвижной состав, экспериментальные исследования.

Keywords: coefficient of friction, contact "wheel—rail", activator of friction, rolling-stock, experimental studies.

Одна из актуальных проблем разработки эффективных материалов, регулирующих трение в контакте "колесо—рельс" — обоснование фрикционных характеристик, которые должны формироваться на поверхности катания в зоне контакта колес с рельсами после нанесения активаторов и модификаторов трения. Для оценки условий применимости активаторов трения проанализировали работы отечественных и зарубежных ученых по изучению закономерностей сцепления колес с рельсами, обусловленные влиянием различных факторов: скорости движения, проскальзывания, наличия поверхностных загрязнений, влажности, температуры окружающей среды, применение песка, фрикционных характеристик контактных поверхностей.

Для оценки коэффициента сцепления в зависимости от скорости движения в режиме тяги и торможения Н.П. Петров предложил усредненную аналитическую зависимость. В основе правил производства тяговых расчетов заложен метод усредненных сил тяги локомотива А.Л. Лисицына и Л.А. Мугинштейна (усовершенствованный метод Н.П. Петрова) (рис. 1) [1, 2].

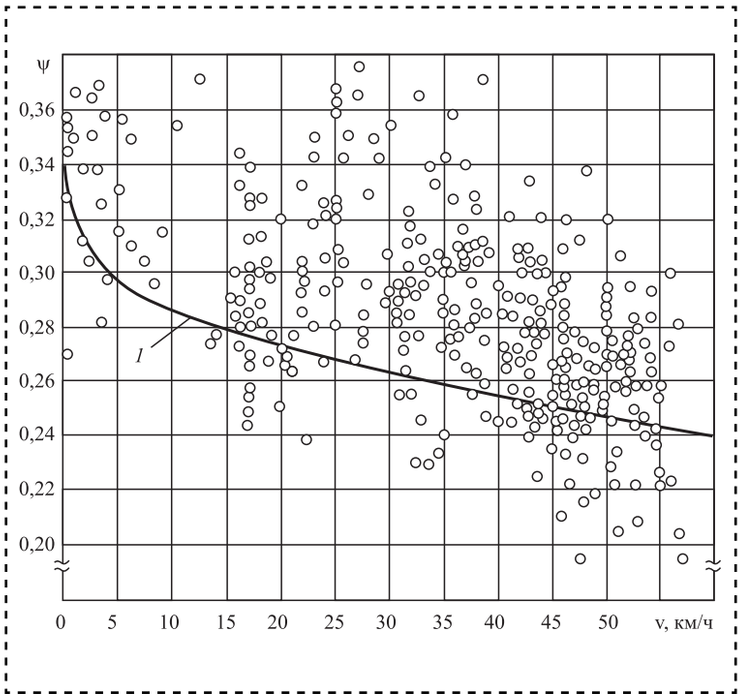


Рис. 1. Коэффициент сцепления в эксплуатационных условиях ψ:
1 — расчетный коэффициент сцепления в зависимости от скорости движения электровоза ВЛ10

sb118.indd 27 10.01.2018 9:29:11

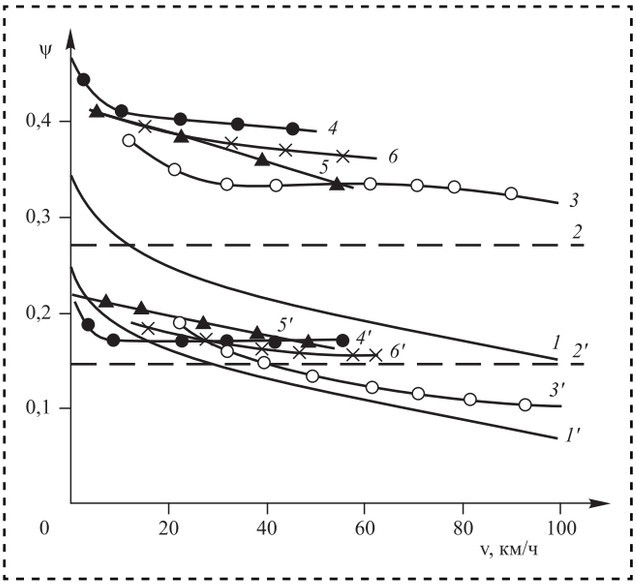


Рис. 2. Верхние (*1—6*) и нижние (*1′—6′*) границы изменения коэффициентов сцепления колес подвижного состава с рельсами в зависимости от скорости движения

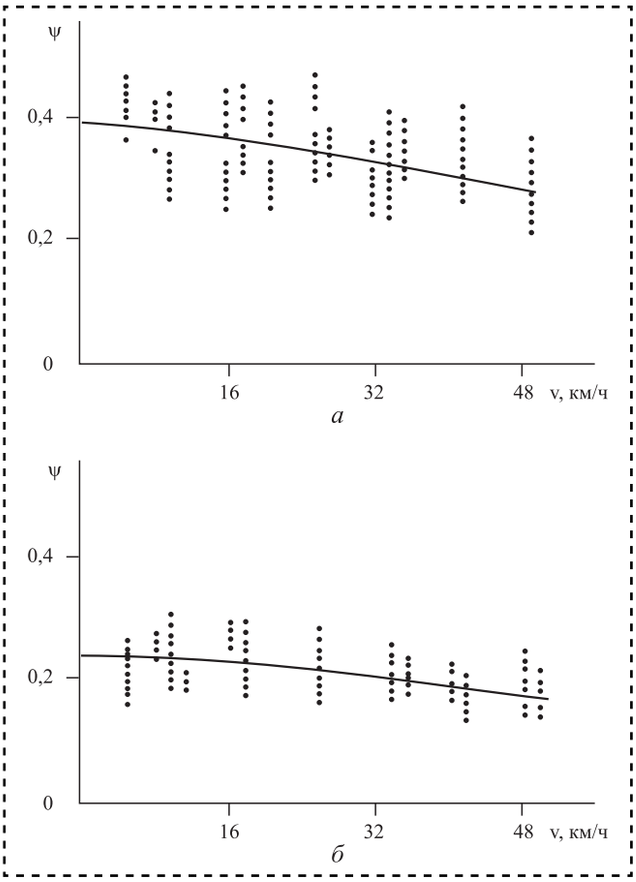


Рис. 3. Характер изменения коэффициентов сцепления колес подвижного состава на сухих (*а*) и увлажненных (*б*) рельсах

Коэффициенты сцепления тягового подвижного состава с рельсами при разных погодных условиях

Состояние рельсов	Коэффициент сцепления	
	Трамвай	Железнодорожный транспорт
Сухие, посыпанные песком	0,29	0,35
Мокрые, чисто отмытые	0,27	—
Сухие, вскоре после дождя	0,25	—
Сухие, в нормальном состоянии	0,16	0,22
Обильно смоченные	—	0,20
При гололеде	0,10	—
При гололеде, но с использованием песка	0,18	—

На основании проведенных экспериментальных исследований Ю.М. Лужновым, В.А. Примаком, Е.Я. Рогачевым определены верхние и нижние границы изменения коэффициента сцепления в зависимости от скорости движения (рис. 2) [3—5].

Влияние погодных условий на реализуемый коэффициент сцепления подробно рассмотрено в работе [7] Ю.М. Лужнова (рис. 3, таблица).

Оценка изменения коэффициента сцепления от степени увлажнения поверхностей колес и рельсов представлена на рис. 4 [3—5]. В реальных условиях эксплуатации коэффициент сцепления сильно зависит от фрикционного состояния поверхностей трения, связанного со степенью их увлажнения и скоростью движения. Эта закономерность установлена в ходе полевых испытаний С.И. Косикова и Ю.П. Топорова (рис. 5).

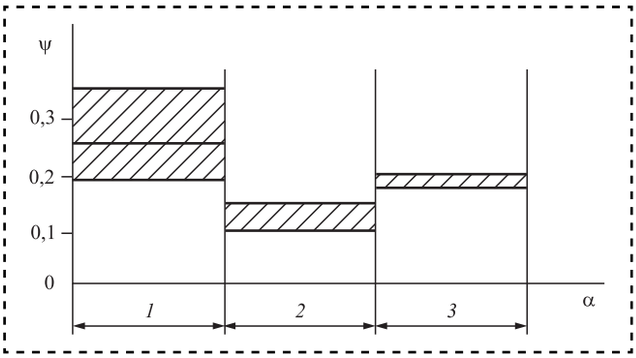


Рис. 4. Изменение коэффициента сцепления колес подвижного состава с рельсами в зависимости от степени их увлажнения:
1 — сухие рельсы; *2* — слегка увлажненные; *3* — мокрые

sb118.indd 28 10.01.2018 9:29:12

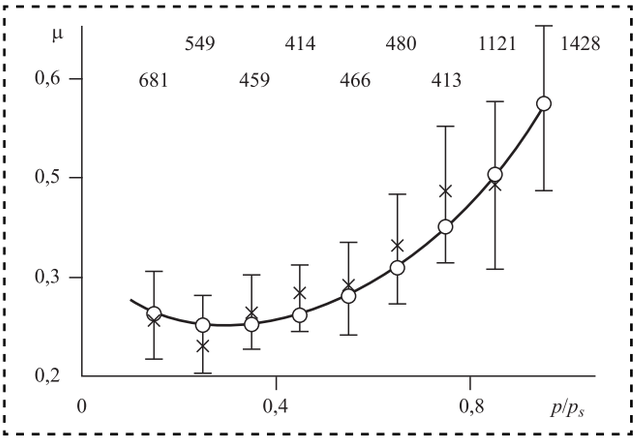


Рис. 5. Зависимость коэффициента статического трения μ, измеренного трибометром по центральной дорожке трения рельсов, от относительной влажности прилегающего к рельсу слоя воздуха p/p_s (цифры — число выполненных опытов, вертикальные линии — их доверительный интервал)

Зависимость расчетного коэффициента сцепления от состояния поверхности рельса

Сухой и чистый	0,25...0,30
Сухой песок	0,25...0,33
Влажный и чистый	0,18...0,20
Мокрый с песком	0,22...0,25
Смазочный материал	0,15...0,18
Влажный	0,09...0,15
Небольшой снег	0,1
Небольшой снег с песком	0,15
Влажные листья	0,07

На уровень реализуемого коэффициента сцепления влияет реология материалов колес и рельсов, влага на их поверхности, поверхностные загрязнения. Разброс значений при эксплуатации составляет 0,1...0,6.

Тщательный анализ факторов, оказывающих влияние на коэффициенты сцепления, позволил И.П. Исаеву и Д.К. Минову представить структуру коэффициента сцепления локомотива следующим образом [8, 9]:

$$\psi = \psi_0 \acute{\eta}_{ск} \acute{\eta}_0 \acute{\eta}_{дин}, \quad (1)$$

где ψ_0 — основной коэффициент сцепления лимитирующей оси, зависящий от фрикционных свойств поверхностей трения колес и рельсов;

$\acute{\eta}_{ск}$ — коэффициент, учитывающий относительное скольжение колес по рельсам (перемещающееся боксование и принудительную остановку колес в рельсовой колее);

$\acute{\eta}_0$ — основной коэффициент использования сцепного веса локомотива, учитывающий влияние расхождения тяговых характеристик двигателей, различие диаметров бандажей колесных пар, неравномерность статической развески по осям и колесам локомотива, устойчивое перераспределение вертикальных нагрузок по осям, вызванное реализацией тяговых и тормозных сил и т.п.;

$\acute{\eta}_{дин}$ — динамический коэффициент использования сцепного веса локомотива, учитывающий периодические колебания вертикальных нагрузок и сил по осям локомотива.

Коэффициенты $\acute{\eta}_0$, $\acute{\eta}_{дин}$, $\acute{\eta}_{ск}$, характеризующие влияние конструкционных особенностей подвижного состава и рельсового пути, а также режима ведения поезда на степень реализации предельного коэффициента сцепления, часто объединяют и называют результирующим коэффициентом использования сцепного веса локомотива $\acute{\eta}$:

$$\psi = \psi_0 \acute{\eta}. \quad (2)$$

По данным экспериментального кольца железнодорожного испытательного полигона ЦНИИ МПС и исследований Ю.М. Лужнова, С.И. Косикова коэффициент использования сцепного веса имеет значения от 0,65 до 0,98 [3, 10]. При скорости движения локомотива, близкой к нулю, коэффициент использования сцепного веса имеет наибольшее значение. Один из важнейших параметров, определяющий фрикционные свойства узла трения колесо—рельс, — основной коэффициент сцепления еще недостаточно исследован.

В опытах, выполненных в условиях строгого контроля фрикционных свойств дорожек трения рельсов, установили для ряда типов локомотивов зависимости коэффициента сцепления от коэффициента трения (рис. 6):

ВЛ8

$$\psi = -2{,}95\mu^2 + 3{,}05\mu - 0{,}4; \quad (3)$$

ВЛ23

$$\psi = 1{,}1\mu^2 - 0{,}06\mu + 0{,}134; \quad (4)$$

ВЛ60^{к}

$$\psi = -0{,}80\mu^2 + \mu + 0{,}047; \quad (5)$$

ВЛ60^{ки}

$$\psi = -0{,}92\mu^2 + 1{,}04\mu + 0{,}064. \quad (6)$$

Границы применения этих выражений находятся в пределах μ = 0,2...0,5. Они позволяют перейти от выявленных закономерностей изменения фрикционных свойств рельсов, обуслов-

sb118.indd 29 10.01.2018 9:29:12

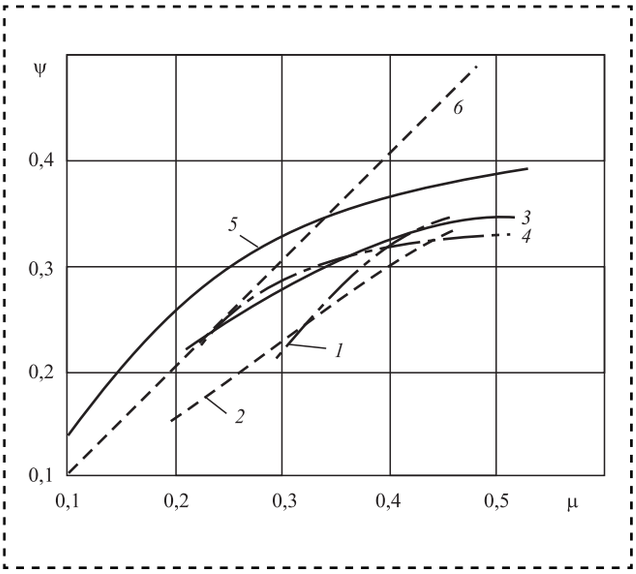


Рис. 6. Связь между коэффициентом сцепления электровозов с рельсами ψ в момент их трогания и коэффициентом трения μ, измеренным по центральной части дорожки катания колеса по рельсу:
1 — ВЛ8; *2* — ВЛ23; *3* — ВЛ60^{к}; *4* — ВЛ60^{ки}; *5* — по данным Коллинза и Причарда; *6* — линия прямой пропорциональности между μ и ψ

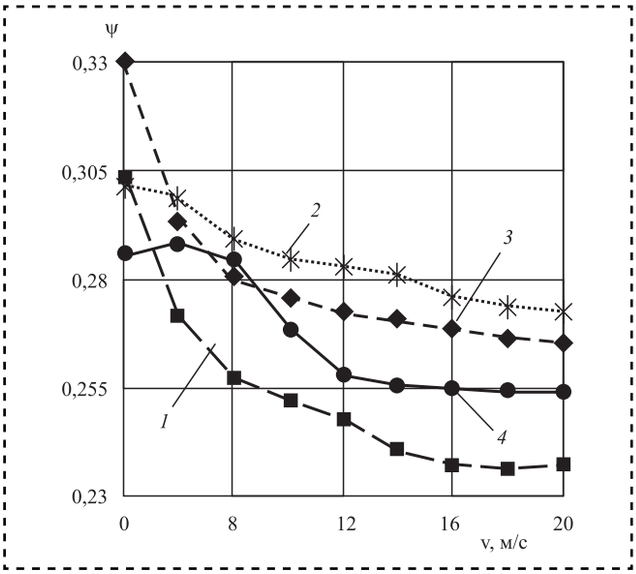


Рис. 7. Зависимость коэффициента сцепления от скорости движения локомотива:
1 — сухой контакт; *2* — при нанесении ФСМ РАПС-Ф (эксперименты на катковом стенде); *3* — расчетная зависимость; *4* — при нанесении песка

ленных степенью их увлажнения и техническим состоянием колесных пар и рельсового пути, непосредственно к сцеплению локомотивов.

Анализируя графические зависимости изменения коэффициента сцепления локомотива ψ в момент начала движения от коэффициента трения μ, измеренного по центральной части дорожки катания колеса по рельсу, наблюдали корреляцию значений коэффициентов сцепления ψ и коэффициентов трения μ в зоне тяговых поверхностей колеса и рельс. Кривые ψ(μ) для различных локомотивов по форме похожи и изменяются по параболической функции, близкой к линии прямой пропорциональности между μ и ψ. Для различных серий электровозов рассчитанные значения коэффициентов трения μ находятся в пределах 0,1...0,5 [7].

Для реализации тяговых сил без боксования необходим коэффициент сцепления ψ не ниже 0,22...0,25. Такой уровень коэффициента сцепления обеспечивается при μ = 0,20...0,35.

В работах [6, 11] представлены исследования изменения коэффициента сцепления на катковом стенде от скорости движения при использовании активаторов сцепления, в ходе которых построены зависимости, характеризующие изменения коэффициента сцепления от скорости качения катков, моделирующих контакт колеса с рельсом с масштабным коэффициентом 1:5 (рис. 7). Для оценки согласованности результатов модельных испытаний, выполненных на установке СМТ-1, определяли расчетные значения коэффициента сцепления локомотива ψ, по эмпирическим формулам, используемым в тяговых расчетах, например для электровозов ВЛ8, ВЛ23:

$$\psi = 0,25 + \frac{8}{100 + 20v}, \qquad (7)$$

где v — скорость движения.

Опытные зависимости коэффициентов сцепления от скорости движения локомотива удовлетворительно согласуются с расчетными значениями коэффициента сцепления (см. рис. 7). При этом использование фрикционного смазочного материала (ФСМ) позволяет получать более пологую характеристику зависимости коэффициента сцепления от скорости движения локомотива (кривая *2*), что более полно реализует его тяговые возможности.

Проведенные исследования доказывают выдвинутое предположение о том, что управляющий фактор при повышении коэффициента сцепления колеса с рельсом в условиях ФСМ — величина проскальзывания колеса относительно рельса, а эффективность использования ФСМ заключается в улучшении реализации тяговой силы локомотивов и снижении местных износов

sb118.indd 30 10.01.2018 9:29:12

колес за счет стабилизации процесса сцепления колеса с рельсом при боксовании, юзе, срыве сцепления и проскальзывании при вписывании в кривой участок пути.

Выводы

Рассмотрены способы регулирования коэффициента сцепления в контакте "колесо—рельс" в целях разработки эффективных активаторов и модификаторов трения, регулирующих трение на поверхности катания колес с рельсами. Установлено, что в реальных условиях эксплуатации коэффициент сцепления ψ в контакте колеса локомотива с рельсом меняется от 0,06 до 0,15 при наличии лубрикантов в зоне сцепления, до 0,33...0,35 при сухом контакте с песком и до 0,38...0,60 при применении активаторов трения. При таком разбросе значений фактических коэффициентов сцепления и трения устанавливать фиксированные значения коэффициентов трения для активаторов трения на этапе их разработки нецелесообразно, так как это ограничит их применение по формальному признаку.

Библиографический список

1. **Лисицын А.Л., Мугинштейн Л.А.** Нестационарные режимы тяги. Тяговое обеспечение перевозочного процесса. М.: Интекст, 1996. 159 с.
2. **Мугинштейн Л.А., Лисицын А.Л.** Нестационарные режимы тяги. Сцепление. Критическая норма массы поезда. М.: Интекст, 1996. 176 с.
3. **Лужнов Ю.М.** Физические основы и закономерности сцепления колес локомотивов с рельсами: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МИИТ, 1978.
4. **Примак В.А.** О расходе песка локомотивами // Тр. ХабИИТ. Вып. 21. М.: Транспорт, 1966.
5. **Рогачев Е.Я.** Мероприятия по уменьшению буксования паровозов, вызываемого заиндевением рельсов // Техника железных дорог. 1952. № 10. С. 22—24.
6. **Майба И.А.** Повышение эксплуатационной эффективности фрикционных систем железнодорожного подвижного состава: дис. ... д-ра техн. наук. Ростов н/Д: РГУ МПС. 1999.
7. **Лужнов Ю.М.** Нанотрибология сцепления колес с рельсами. Реальность и возможности. М.: Интекст, 2009. 176 с.
8. **Минов Д.К.** Теория процесса реализации сил сцепления при электрической тяге и способы повышения их использования // В сб.: Проблемы повышения эффективности работы транспорта. М.: Изд-во АН СССР. 1963.
9. **Исаев И.П.** Проблемы повышения надежности технических устройств железнодорожного транспорта. М.: Транспорт, 1968. 159 с.
10. **Косиков С.И.** Фрикционные свойства железнодорожных рельсов. М.: Наука, 1967. 112 с.
11. **Майба И.А., Данилейко Д.А., Глазунов Д.В.** Активизация сцепления в системе "колесо—рельс" на основе применения модификаторов трения нового поколения // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2008. № 3 (31). С. 5—12.

Читайте в следующем номере:

Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Степанов А.С. Обоснование параметров устройств и режимов движения поворотной платформы двухшпиндельного шпильковерта

Гречников Ф.В., Яковишин А.С., Захаров О.В. Минимизация объема измерений плоских поверхностей деталей при сборке

Матвеев И.А., Ямников А.С., Ямникова О.А. Влияние погрешностей базовой детали на погрешности сборки протяженных осесимметричных корпусов

Меделяев И.А. Процессы в зоне контакта трибологических систем

Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Мигранов А.М. Исследование многослойных композиционных покрытий для режущего инструмента

Ноженков М.В. Вихревые потоки в диссипативных системах

Гурьянов Г.Н., Платов С.И., Огарков Н.Н., Шеметова Е.С. Запрессовка рабочего вкладыша инструмента как способ повышения его прочности при волочении проволоки

sb118.indd 31 10.01.2018 9:29:12

УДК 621.726

М.Ш. Мигранов, *д-р техн. наук*
(Уфимский государственный авиационный технический университет),
Г.С. Фукс-Рабинович, *д-р техн. наук*
(Университет МакМастер, г. Онтарио, Канада),
Л.Ш. Шустер, *д-р техн. наук,* **А.М. Мигранов**
(Уфимский государственный авиационный технический университет)
E-mail: migmars@mail.ru

Износостойкость порошковых инструментальных материалов

Представлены результаты исследования особенностей износа режущих инструментов, изготовленных путем спекания порошков на основе быстрорежущей стали. Показано, что порошковые инструментальные материалы на основе быстрорежущей стали, дополнительно легированные карбидом титана (карбидосталь), обладают высокой износостойкостью и их можно классифицировать как новый класс самоорганизующихся инструментальных материалов. Износостойкость такого инструмента в 2—3,5 раза выше износостойкости обычных инструментов из быстрорежущей стали.

The results of a study of the wear characteristics of cutting tools made by sintering powders based on high-speed steel are presented. It is shown that powder tool materials based on high-speed steel, additionally doped with titanium carbide (carbidostal), have high wear resistance and can be classified as a new class of self-organizing tool materials. The wear resistance of such a tool is 2—3.5 times higher than the wear resistance of conventional high-speed steel tools.

Ключевые слова: износостойкость, самоорганизация при трении, инструментальные материалы, триботехнические свойства, вторично-ионная масс-спектрометрия, Оже-электронная спектроскопия.

Keywords: wear resistance, self-organization in friction, tool materials, tribotechnical properties, secondary-ion mass spectrometry, Auger electron spectroscopy.

Традиционные инструментальные материалы, как правило, имеют повышенную твердость. Износостойкость инструментов в значительной мере определяется свойствами поверхности [1]. Тем не менее твердость чаще всего используется как отправная точка при определении принципов для плавления, спекания, легирования инструментальных материалов, и это в какой-то степени закономерно.

В настоящее время лезвийная обработка резанием требует более полного использования последних достижений в трибологии и термодинамических подходов к анализу контактных явлений при трении и износе [1—3]. Трибосистема рассматривается как открытая термодинамическая система и описывается первым и вторым принципами термодинамики. Согласно первому принципу, работа сил трения $W_{тр}$ в основном преобразуется в тепло Q и частично — во внутреннюю энергию материалов трибосистемы ΔE:

$$W_{тр} = Q + \Delta E.$$

Процессы разрушения и отделения частиц износа возникают и развиваются в результате увеличения (активации) и уменьшения (пассивации) энергии поверхности. Высвобождение тепла Q обусловливает термическую активацию процессов при трении, а величина ΔE играет основную роль в контактных процессах в зоне резания, определяет механизм развития новых фаз и структур, контролирует величину и тип их деформации и последующее разрушение. Активация приводит поверхностные слои в неравновесное состояние. Таким образом, за активацией следует пассивация с последующим взаимодействием с окружающей средой и образованием защитных структур.

Согласно второму принципу термодинамики в открытых системах при определенных соотношениях потоков энергии и вещества можно наблюдать процессы упорядочения. Этот процесс соответствует уменьшению энтропии и появлению самоорганизующихся рассеивающихся

sb118.indd 32 10.01.2018 9:29:12

структур [1, 3]. Это и есть отличие открытых систем от закрытых, где энтропия может только увеличиваться. Термин "структура" в этом случае рассматривается в термодинамическом смысле как вид связи между отдельными частями системы. Для явления самоорганизации характерен принцип экранирования, и состоит он во взаимосвязи процессов разрушения и регенерации (восстановления) в зоне трения. Существует динамическое равновесие между процессами активации и пассивации на поверхностных слоях. Когда равновесие нарушается, начинается разрушение материала поверхности. Таким образом, эффект экранирования при трении препятствует всем видам непосредственного взаимодействия поверхностей трибопары и разрушению основного металла. Контакт трибопары осуществляется с помощью вторичных структур, образующихся в зоне трения. Рассеивание энергии во время трения связано с формированием устойчивых рассеивающих структур на контактной поверхности. Этот процесс можно рассматривать как пример использования самоорганизующихся явлений в технике.

Самоорганизация во время трения сопровождается уменьшением эффективного объема материалов, в которых все виды взаимодействия имеют место, в том числе и локализация взаимодействий в тонких слоях на поверхности. Этот процесс происходит с максимальным расходом энергии, вплоть до разрушения. Одновременно самовосстанавливающиеся тонкие пленки появляются на трущихся поверхностях, и их свойства существенно отличаются [3].

Значение применения этого явления в технике и технологии неоспоримо. Уже в настоящее время можно говорить о перспективных разработках материалов нового поколения. В инструментальном производстве произойдет переход к материалам с программируемыми свойствами самоорганизации [5]. Основную концепцию конструирования трибосопряжений обеспечат самоорганизующиеся износостойкие материалы. Основное отличие таких материалов от традиционных состоит в их активной адаптации к внешним физическим воздействиям. Фазовые и структурные превращения с образованием устойчивых слоев, которые эффективно защищают контактирующие поверхности инструментов, возникают в этих материалах в зоне резания. Эти фазы обладают хорошими термическими свойствами, высокой прочностью и обеспечивают низкие коэффициенты трения. Легирование самоорганизующихся материалов должно способствовать развитию этих явлений. В этом случае появляется возможность направленно воздействовать на трение и способствовать максимальному увеличению износостойкости трибосистемы [6].

Цель работы — определение конкретных методов воздействия на трение и износ инструментов при резании на основе явления самоорганизации.

Решение этой задачи включает в себя:

1) исследование процессов износа и явления самоорганизации при резании с инструментами, спеченными из порошковых материалов на основе быстрорежущей стали с добавлением карбида титана;

2) анализ дополнительного легирующего воздействия на состав, структуру и свойства вторичных структур при резании инструментами, изготовленными из рассматриваемых материалов.

Исследовали износостойкость и триботехнические характеристики при изменении состава и атомной структуры поверхностного слоя материала во время обработки (резания). В качестве исследуемых материалов выбраны: быстрорежущие стали Р6М5, Р12М3Ф2К5 и порошковые спеченные сплавы на основе быстрорежущих кобальтовых сталей с добавлением 20 % карбида титана (табл. 1). Технология производства спеченных порошковых материалов включает в себя: смешивание порошковых материалов, спекание и горячую штамповку выдавливанием.

Исследования износостойкости проводили при обработке точением углеродистой стали 45

Таблица 1

Химический состав исследуемых инструментальных материалов

Материал	Аналог по AISI	Массовая доля элементов, %						
		C	W	Mo	Cr	V	Co	Ti
Р6М5 (ГОСТ 19265—73)	М2	0,8...0,88	5,0...5,5	5,0...5,5	3,8...4,2	1,7...2,1	—	—
Р12М3Ф2К5	Т15	1,05...1,15	11,5...12,5	2,5...3,0	3,9...4,3	1,8...2,3	5,0...5,5	—
Карбидосталь	—	4,5...5,0	4,8...5,8	3,8...4,3	3,0...7,5	1,3...1,8	3,8...4,3	15,0...17,0

sb118.indd 33 10.01.2018 9:29:13

твердостью 180...200 HB четырехгранными быстросменными инструментальными пластинами размером 12×12 мм.

Режимы резания:

Скорость резания, м/мин . . . . . 70...55
Глубина резания, мм 0,5
Подача, мм/об. 0,28

Триботехнические свойства исследуемых трибопар определяли с помощью адгезиомера [6]. Для этого индентор из исследуемого инструментального материала сжимали двумя отполированными образцами стали 45 твердостью 30 HRC или 180 HB (рис. 1). Чтобы смоделировать рабочие условия трения, поверхность образцов нагревали электроконтактным методом. Температуру во время испытаний изменяли от 150 до 500 °С. Стандартные нагрузки доходили до 2400 Н, тем самым обеспечивая пластическую деформацию на контакте. В качестве критерия износостойкости использовали адгезионную составляющую коэффициента трения, ответственную за интенсивность износа при резании с быстрорежущей сталью. Этот параметр определен как отношение прочности адгезионных связей на срез τ_n к нормальным напряжениям P_{rn}, действующим на поверхности сферы индентора при соответствующей температуре.

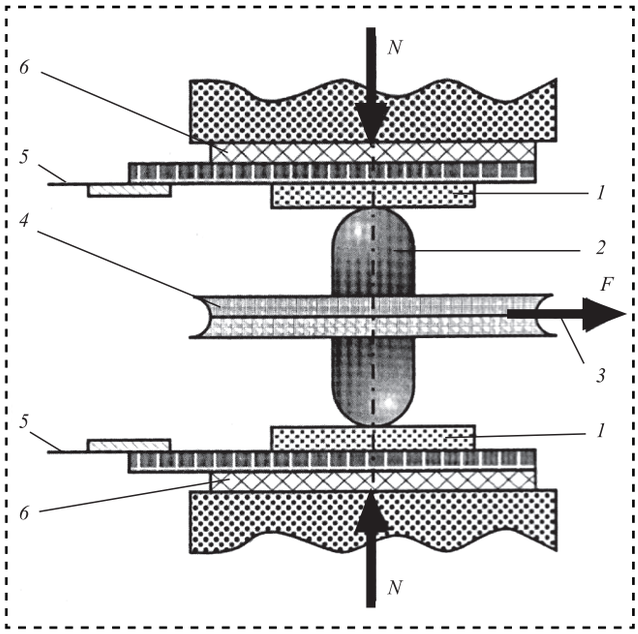


Рис. 1. Модель установки для исследования триботехнических свойств:

1 — отполированные образцы из обрабатываемого материала; *2* — индентор; *3* — тросик, обеспечивающий вращение индентора; *4* — специальный диск; *5* — медные пластины; *6* — изоляторы

При взаимодействии двух твердых тел (особенно при высоких температуре и давлении) на контактирующей поверхности возникает слой, представляющий собой так называемое "третье тело". Этот слой способен существовать в различных состояниях: как в жидком, так и в твердом. Расчетная величина τ_n есть не что иное как сопротивление сдвигу "третьего тела" под давлением, вызывающим пластическую деформацию в наиболее мягком из контактирующих твердых тел. Очевидно, что условия трения на поверхности режущего инструмента близки к условиям, для которых рассчитана величина τ_n [6].

Исследование микроструктуры поверхности инструмента выполняли с помощью сканирующей электронной микроскопии и локального рентгеновского спектрального анализа на микроскопе JSM-U3, оборудованном рентгеновским спектрометром для рассеивания волн на основе двух кристаллов при ускоряющем напряжении 20 кВ. В качестве анализаторов использовали кристаллы LiF и MYR.

Химические и фазовые составы инструментальных материалов, а также составы пленок, образовавшихся на инструменте и в лунках, исследовали с помощью сканирующей Оже-электронной спектроскопии (ОЭС/AES) и спектроскопии вторичной массы (СВИИМ/SIMS) спектрометром ESCALAB—MK2, оборудованным электронным прожектором LEG200, ионным прожектором AG6 и анализатором ионной массы SQ300 квадроугольного типа.

Для исследования химического состава изготовлены образцы в виде косых шлифов под углом 5° к верхней части режущих пластинок, которые позволили исследовать гетерогенность состава на небольшой глубине под поверхностью, включая образовавшиеся пленки. Образцы обезжиривали и помещали внутрь подготовительной камеры спектрометра, подвергали травлению 5 мин в среде ионов аргона под давлением 10^{-4} Па и со скоростью травления порядка 20 монослоев в минуту. Такая подготовка образцов исключила воздействие случайного загрязнения на результаты анализа. Поверхность образцов исследовали на различных глубинах, начиная от поверхности: либо с помощью стационарного электрона и ионных лучей, либо сканированием их по выбранному направлению.

Оже-спектры зарегистрированы в режиме CRR = 4 при скорости 2,1 эВ/с, первичной электронной энергией E = 5000 эВ и вакууме порядка $2\cdot10^{-8}$ Па. При проведении спектроскопии массы ионный луч аргона диаметром 0,5 мм зафикси-

sb118.indd 34 10.01.2018 9:29:13

рован на участке мишени (заданной точке) при ускоряющем напряжении в 5,0 кэВ и давлении аргона $2 \cdot 10^{-5}$ Па. При заданном режиме скорость травления не превышала 1 монослоя в минуту. Анализ сделан в режиме, приближенном к статическому.

Порошковые сплавы на основе быстрорежущей стали, легированные карбидом титана, принадлежат к самоорганизующимся материалам [3]. На рис. 2, *а* показано распределение фаз с различной твердостью в структуре спекаемых порошковых материалов на основе быстрорежущей стали. Фотоснимок отполированного косого шлифа получен на сканирующем электронном микроскопе в режиме вторичной электронной эмиссии. Контрасты, появившиеся на электронном изображении, связаны с различием химического состава в некоторых микрозонах образца: содержанием элементов легкого и тяжелого веса (так называемого контраста по атомному числу). Темные частицы больших размеров титанового карбида (менее 20 мкм в поперечном сечении), а также рассеянные сферические вольфрамовые и молибденовые карбиды (менее 0,2...1,0 мкм в диаметре) в структуре матрицы мелкие частицы на основе быстрорежущей стали равномерно распределены по всему объему.

В образцах наблюдается значительная неоднородность в распределении легких элементов C и N. На рис. 2, *б—г* представлено изменение в интенсивности характерной Kα эмиссии Ti, C и N во время прохождения луча над областью образца (см. рис. 2, *а*). Обнаружено, что содержание углерода в титановых, вольфрамовых и молибденовых карбидах в матрице выше, чем в твердом растворе. Азот содержится в основном в матрице быстрорежущей стали. Его наличие, вероятно, связано с растворением при напылении порошком из быстрорежущей стали в азотной среде на первых стадиях производства.

Результаты испытаний на износостойкость показали, что износ инструментов по задней поверхности из обычных быстрорежущих сталей значительно (в 2,0—3,5 раза) больше износа инструмента из спеченного порошкового материала в основном за счет снижения интенсивности изнашивания и расширения зоны нормального износа (рис. 3).

В зоне нормального износа интенсивность изнашивания инструмента из спеченного порошкового материала гораздо ниже, чем для быстрорежущей стали (рис. 3, кривая *3*). Электронная микроскопия поверхности образцов, изготовленных из различных материалов, не показала качественных изменений в механизме износа. Резание с наростообразованием типично для инструментов из всех исследуемых материалов, причем наростообразование достаточно стабильное во всех случаях. Хотя твердость и теплостойкость быстрорежущей стали Р12М3Ф2К5 и спеченного порошкового материала (карбидосталь) довольно близки (табл. 2), износостойкость последнего значительно выше. Различие в интенсивности

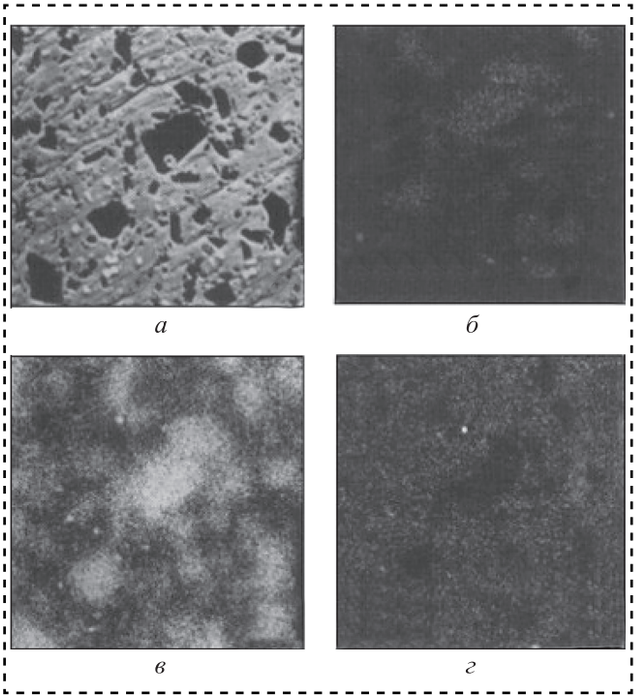


Рис. 2. Микроструктура спеченного порошкового материала на основе быстрорежущей стали с добавлением 20 % карбида титана, ×750:
а — поверхность во вторичных электронах; *б* — поверхность эмиссии Ti Kα; *в* — поверхность эмиссии C Kα; *г* — поверхность эмиссии N Kα

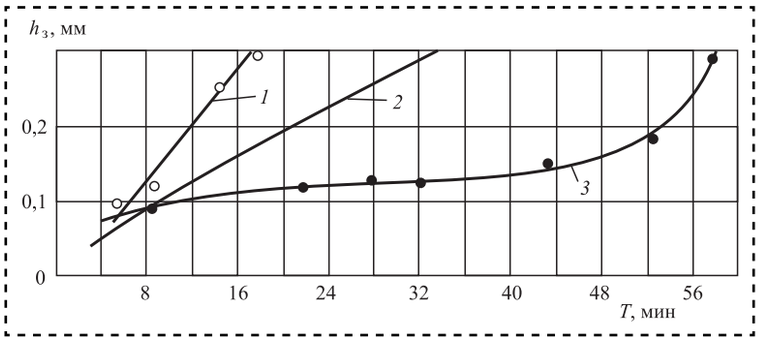


Рис. 3. Зависимость износа по задней поверхности от периода стойкости инструмента при точении стали 45:
1 — Р6М5; *2* — Р12М3Ф2К5; *3* — Р6М5 + 20 % TiC

sb118.indd 35 10.01.2018 9:29:13

Таблица 2

Свойства исследуемых материалов

Материал	Режимы спекания			Физико-механические свойства		
	Температура затвердевания, °С	Температура прессования, °С	Твердость после спекания HRC	Прочность, МПа	Тепло-проводность, кДж/м^2	Термо-стойкость, °С
Р6М5	1220	560	63...65	3200	400	610
Р12М3Ф2К5	1240	560	67...68	2400	220	645
Карбидосталь	1210	560	69...70	2000	80	655

изнашивания можно объяснить процессами на поверхности инструмента. Более низкая интенсивность износа инструментов из спеченных порошковых материалов может быть связана с присутствием карбида титана в их структуре и в значительной степени с образованием соединений, содержащих кислород (кислородсодержащих соединений) при резании.

При исследовании методом электронной микроскопии (STMS) в фазовом составе поверхности инструмента и в лунке под индентором обнаружено образование кислородсодержащих фаз [5, 6]. Преобразование карбида титана в кислородосодержащую фазу происходит уже на начальной стадии износа (в зоне приработочного износа) (рис. 4, *а*). В процессе дальнейшего резания увеличивается образование оксида титана на контактных поверхностях (рис. 4, *б* и *в*). Этот процесс сопровождается стабилизацией интенсивности износа (см. рис. 3, рис. 4, *б*, *в*) с уменьшением его величины и расширением зоны нормального износа. Очевидно, это определяется явлением самоорганизации, которое связано с возникновением при трении вторичных структур в виде кислородсодержащих соединений титана, играющих роль твердой смазки и устойчивых при резании [3, 4]. Тонкие поверхностные пленки типа TiO эффективно защищают поверхностный слой от дальнейшего износа и стабилизируют процесс износа.

На явления структурной самоорганизации поверхностного слоя указывают и результаты исследования подповерхностных слоев обрабатываемого материала. Данные, полученные с помощью ОЭС/AES, показывают, что с увеличением времени резания содержание кислорода на поверхности контакта с резцом понижается (рис. 5). В то же время содержание углерода и азота увеличивается. Это отчетливо проявляется в изменениях интенсивности характерных KLL-линий O, N и C на оже-спектрах.

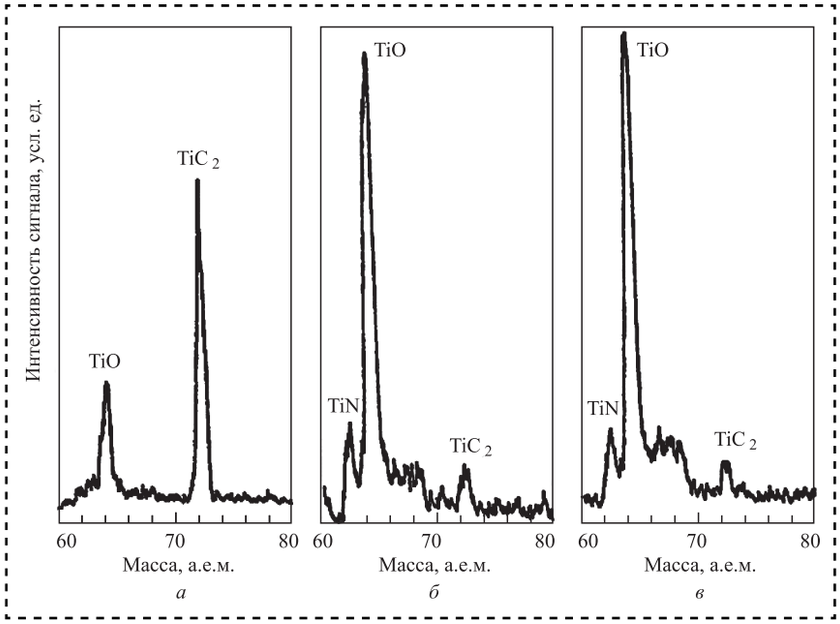


Рис. 4. Спектры вторичной массы поверхности инструмента из спеченного порошкового материала в зависимости от времени резания:
а — после 4 мин; *б* — после 20 мин; *в* — после 24 мин

При сканировании ОЭС/AES косых шлифов исследовали природу химической микронеоднородности наростов (налипов) и пленок, образовавшихся на режущем инструменте. На рис. 6 представлено распределение интенсивности характерных оже-KLL-линий для O, N, C и LMM-линий из Ti при прохождении электронного луча над поверхностью косого шлифа. Проходящий луч пересекает наросты (из стали 40, точка 0) и приповерхностные пленки, образовавшиеся на режущем инструменте (при H = 1,4 мкм). Наблюдаемые изменения в хими-

sb118.indd 36 10.01.2018 9:29:13

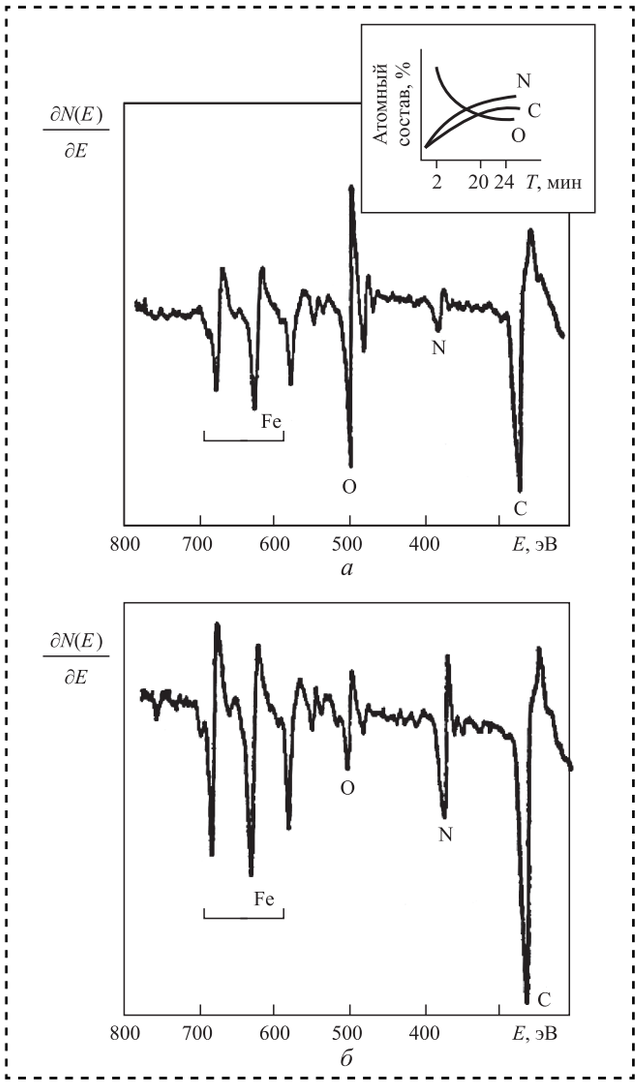


Рис. 5. Оже-спектры поверхности обрабатываемого материала:
а — после 2 мин резания; *б* — после 20 мин резания

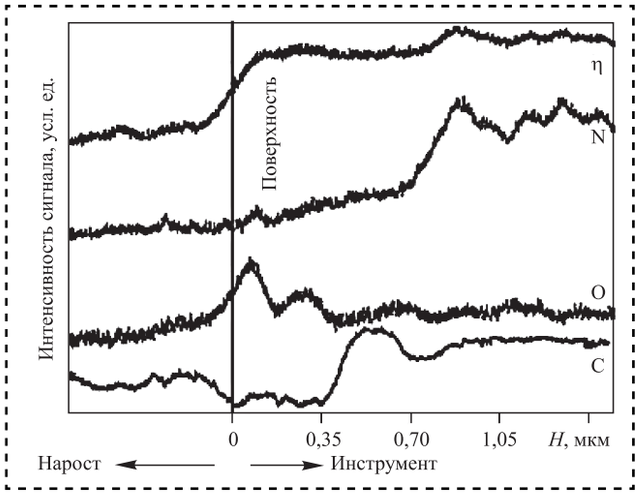


Рис. 6. Распределение химических элементов в контактной зоне

ческом составе приповерхностного слоя инструмента связаны с тем, что при температурах свыше 450 °С карбид титана метастабилен (неустойчив) и имеет тенденцию к разрушению. Вследствие ярко выраженного химического родства с кислородом титан поглощает его из окружающей среды и образует тонкие пленки из кислородсодержащих соединений, при этом углерод наряду с азотом диффундирует из поверхности режущего инструмента в стружку.

Диффузия этих элементов имеет место при высоких температурах и напряжениях в зоне резания. Представленные результаты соответствуют данным, полученным ранее при исследовании изменений в химическом составе поверхности инструмента с покрытием из нитрида титана TiN (ФОП/PVD).

Результаты триботехнических испытаний инденторов, изготовленных из быстрорежущей стали и спеченных порошковых материалов, (рис. 7) показывают, что по мере повышения температуры фрикционные параметры контакта "инструмент—деталь" изменяются немонотонно [7].

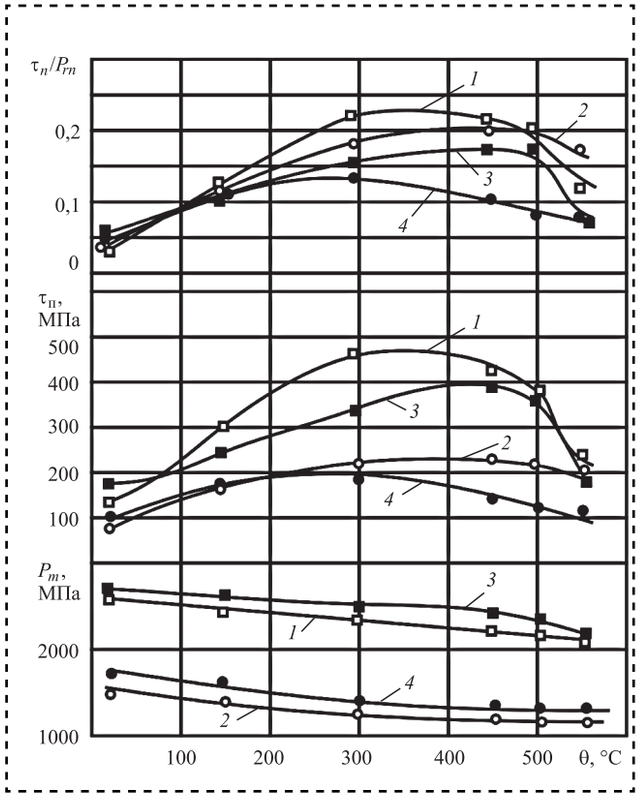


Рис. 7. Влияние температуры на триботехнические свойства материалов:
4, *3* — Р6М5 + 20 % TiC; *2*, *4* — сталь 45 (180...200 HB); *2*, *1* — Р6М5; *1*, *3* — сталь 45 (30...32 HRC)

sb118.indd 37 10.01.2018 9:29:13

В диапазоне температур 150...400 °С увеличение параметров фрикционного контакта связано с интенсификацией адгезионного взаимодействия на контактных поверхностях. Кривые для быстрорежущей стали и для спеченных порошковых материалов подобны друг другу. Однако если при температурах до 200 °С фрикционные параметры практически одинаковы для всех исследуемых материалов, то при более высоких температурах разница между ними начинает увеличиваться.

При температуре около 300 °С схватывание (адгезия) на фрикционной контактной поверхности максимальное. Но фрикционные параметры у спеченных порошковых материалов значительно ниже, чем у обычных быстрорежущих сталей. Это явление, несомненно, связано с окисляемостью карбида титана и с образованием кислородсодержащих соединений на поверхности. Различие фрикционных параметров у быстрорежущей стали и у спеченных порошковых материалов максимально при температурах, приближающихся к температурам работы инструмента 550...600 °С при обработке резанием. Это предопределяет высокие эксплуатационные свойства инструментов из спеченных порошковых материалов (см. рис. 3).

Легирование спеченной порошковой быстрорежущей стали карбидом титана TiC значительно влияет на износостойкость инструмента, особенно если в процессе резания происходит интенсивное преобразование этих соединений в устойчивые кислородсодержащие фазы, которые эффективно защищают контактные поверхности от схватывания (адгезии) при резании, что может широко использоваться в металлообработке материалов с высокой износостойкостью (коронитов, карбидосталей и т.д.).

Вышеупомянутые результаты дают возможность сформулировать требования к составу инструментальных материалов с высоким уровнем самоорганизации. Они должны включать в себя базовую фазу (карбид титана TiC), предусматривающую высокие физико-механические свойства. В процессе трения фаза преобразуется так, что вследствие самоорганизации на поверхности будут образовываться прочные (устойчивые) кислородсодержащие фазы в виде тонкой пленки, эффективно защищающие подложку от внешних воздействий при трении. Выявленный принцип можно реализовать разными способами. Однако предложенный способ носит универсальный характер.

Заключение

Показано, что спеченные порошковые материалы на основе быстрорежущей стали, дополнительно легированные карбидом титана (карбидосталь), имеют высокую износостойкость и могут рассматриваться как новый класс самоорганизующихся инструментальных материалов: совместно спеченные и прессованные порошки карбида титана в качестве основы и быстрорежущая сталь в качестве связующего вещества. Самоорганизация таких материалов проявляется в их способности образовывать устойчивые высокопрочные вторичные структуры, которые эффективно защищают поверхность инструмента от внешних воздействий при резании.

В процессе резания наблюдается преобразование карбидной фазы в устойчивые вторичные структуры, имеющие форму соединений из титана и кислорода. Это значительно улучшает фрикционные свойства при рабочих температурах и, как следствие, повышает износостойкость режущего инструмента. В результате износостойкость такого инструмента в 2,0—3,5 раза выше износостойкости инструмента из быстрорежущих сталей.

Библиографический список

1. **Бершадский Л.И.** Самоорганизация и надежность трибосистем. Киев: Знание, 1981. 35 с.

2. **Польцер Г., Эбиленг В., Фирковский А.** Внешнее трение твердых тел, диссипативные структуры и самоорганизация // Трение и износ. 1988. Т. 9, № 1. С. 12.

3. **Characteristic** features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting / G.S. Fox-Rabinovich and other // Wear. 206. 1997. P. 214.

4. **Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш.** Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.

5. **Лоладзе Т.Н.** Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.

6. **Криони Н.К., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 377 с.

7. **Шустер Л.Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.

sb118.indd 38 10.01.2018 9:29:14

УДК 621.5

Б.М. Эрлих, *канд. техн. наук (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)*
E-mail: uliaerlich@mail.ru

Методика изменения состояния гармонических колебаний

Рассмотрено решение задачи изменения состояния свободных или затухающих гармонических колебаний за заданное время. Структура и параметры необходимого управляющего воздействия определены на основе методов теории оптимального управления. Приведены результаты расчетов для затухающих гармонических колебаний, подтверждающие работоспособность методики.

The solution the problem of changing the state of free or damped harmonic oscillations in a given time is considered. The structure and parameters of the manipulated variable determined on the basis of methods of optimal control theory. The results of calculations for damped harmonic oscillations, confirming the operability of the method are presented.

Ключевые слова: затухающие колебания, изменение состояния колебаний, управляющее воздействие, метод множителей Лагранжа, интегральная интенсивность.

Keywords: damped oscillations, change in the state of oscillations, control action, method of Lagrange multipliers, integrated intensity.

В системе управления процессами важнейшей задачей является определение необходимых управляющих воздействий для перевода их из одного состояния в другое [1, 2]. Эти процессы могут быть и финансовыми, и экономическими, и физико-техническими.

Предложена методика изменения состояния гармонических колебаний в целях перевода его в другое желаемое состояние за заданное время.

Для частного случая перевода свободных и затухающих гармонических колебаний в состояние покоя с помощью одного из методов оптимальноного управления (метода множителей Лагранжа) можно определить необходимое для этой цели управляющее воздействие [1].

Рассмотрена система, описываемая следующим дифференциальным уравнением:

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \tag{1}$$

где $\ddot{x}$ — ускорение;

$\omega_0^2 x$ — составляющая упругой силы;

$2\gamma\dot{x}$ — составляющая силы вязкого трения;

ω_0 — собственная частота колебаний;

γ — коэффициент затухания силы трения ($\gamma = 0$ для свободных колебаний).

Введем в правую часть системы (1) управляющее воздействие $u(t)$, зависящее только от времени t (не зависит от x, $\dot{x}$):

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = u(t). \tag{2}$$

Структуру и параметры управляющего воздействия $u(t)$ необходимо определить при следующих условиях:

— начальное состояние системы $x(0) = x_0$, $\dot{x}(0) = \dot{x}_0$;

— состояние в момент времени T $x(T) = x_k$, $\dot{x}(T) = \dot{x}_k$ или состояние $(x_k, \dot{x}_k)$.

Перейдя в новое состояние, управляющее воздействие обнуляется, и система начинает работать из нового возможно более выгодного положения.

Замена $x = X\exp(-\gamma t)$ приводит уравнение (2) к эквивалентному виду:

$$\ddot{X} + \omega^2 X = U(t);\ \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2};\quad U(t) = u(t)\exp(\gamma t). \tag{3}$$

Для перевода гармонических колебаний, описываемых уравнениями (3), в состояние покоя за любое заданное время T, в работе [1] определено необходимое управляющее воздействие.

Для уравнения (3) перевод в состояние $(x_k, \dot{x}_k)$ обеспечивает один и тот же закон управляющего воздействия:

$$U(t) = \begin{cases} \lambda_1 \sin\omega(T-t) + \lambda_2 \cos\omega(T-t), & t \leqslant T \\ 0, & t > T \end{cases}. \tag{4}$$

Различие заключается только в том, что множители Лагранжа λ_1, λ_2 определяются как решение системы двух других линейных алгебраических уравнений:

$$\left[\int_0^T \sin^2\omega(T-t)\,dt\right]\lambda_1 + \left[\int_0^T \sin\omega(T-t)\cos\omega(T-t)\,dt\right]\lambda_2 = -\omega\cos\omega T x_0 - \sin\omega T \dot{x}_0 + \omega x_k; \tag{5}$$

sb118.indd 39 10.01.2018 9:29:14

$$\left[\int_0^T \sin\omega(T-t)\cos\omega(T-t)\,dt\right]\lambda_1 + \\ + \left[\int_0^T \cos^2\omega(T-t)\,dt\right]\lambda_2 = \\ = \omega\sin\omega_0 T x_0 - \cos\omega T\dot{x}_0 + \dot{x}_k, \quad (6)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$; $\omega_0 > \gamma$.

Вычислительный алгоритм решения задачи состоит из этапов:

1. Задание начальных и конечных условий x_0, $\dot{x}_0, x_k$, $\dot{x}_k$ и параметров T, ω_0, γ.

2. Расчет множителей Лагранжа λ_1, λ_2 как решение системы двух линейных алгебраических уравнений (5), (6).

3. Решение дифференциального уравнения (3) на участке $t \leqslant T$ с законом управляющего воздействия $U(t)$ из выражения (4).

4. Решение дифференциального уравнения (1) с начальными условиями $x(T) = x_k$, $\dot{x}(T) = \dot{x}_k$ на участке $t > T$, где $U(t) = 0$.

5. Расчет интегральной интенсивности воздействия $V(U)$ на участке $t \leqslant T$ по формуле

$$V(U(t)) = \frac{1}{2}\int_0^T U(t)^2\,dt. \quad (7)$$

Возможные варианты применения методики:

1) перевод затухающих колебаний в состояние покоя в момент времени T обеспечивается условиями $x_k = 0$, $\dot{x}_k = 0$ (рис. 1);

2) перевод колебаний из начального состояния покоя $x_0 = 0$, $\dot{x}_0 = 0$ в любое заданное состояние $(x_k, \dot{x}_k)$ в момент времени T (рис. 2);

3) перевод затухающих колебаний из начального состояния $(x_0, \dot{x}_0)$ в состояние с увеличенными в p раз условиями $(px_0, p\dot{x}_0)$ (на рис. 3 показан результат перевода затухающих колебаний из начального состояния $x_0 = 0{,}1$, $\dot{x}_0 = 0{,}1$ в состояние с увеличенными в два раза условиями $x_k = 0{,}2$, $\dot{x}_k = 0{,}2$);

4) перевод из начального состояния $(x_0, \dot{x}_0)$ в состояние с уменьшенными в q раз условиями $(qx_0, q\dot{x}_0)$ (на рис. 4 показан перевод затухающих колебаний из начального состояния $x_0 = 0{,}1$, $\dot{x}_0 = 0{,}1$ в состояние с уменьшенными в два раза начальными условиями $x_k = 0{,}05$, $\dot{x}_k = 0{,}05$);

5) возможны варианты с применением закона управляющего воздействия несколько раз. Например, первый раз перевод из состояния покоя в желаемое состояние и после работы полученного колебания некоторое время в этом состоянии перевод его во второй раз в состояние покоя.

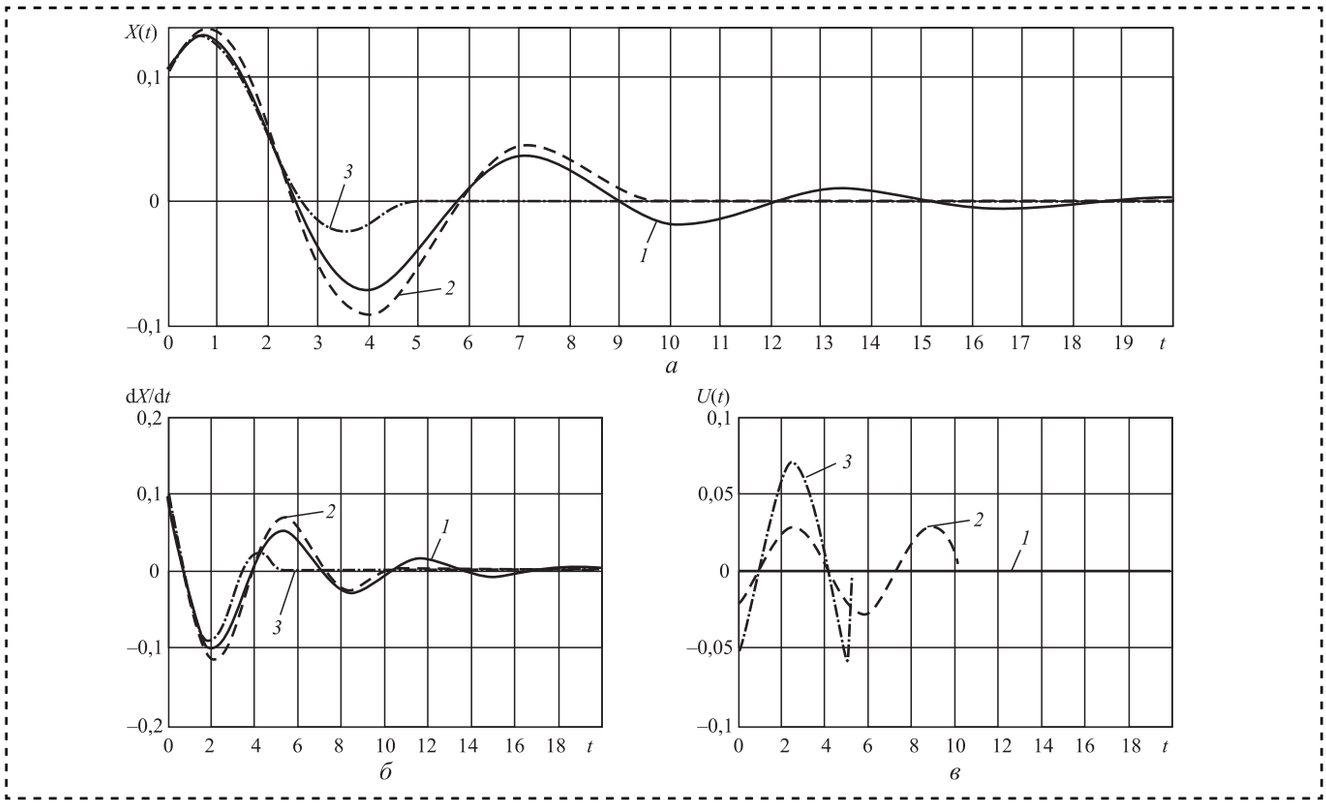


Рис. 1. Зависимости $X(t)$ (*а*), $\dot{X}(t)$ (*б*), $U(t)$ (*в*) перевода затухающих колебаний в состояние покоя для заданных значений T ($\omega_0 = 1$, $\gamma = 0{,}2$, $x_0 = 0{,}1$, $x_1 = 0{,}1$, $x_{0k} = 0$, $x_{1k} = 0$):
1 — $T = 20$; *2* — $T = 10$, $\lambda_1 = 0{,}026304$, $\lambda_2 = 0{,}01075$, V = 0,0039759; *3* — $T = 5$, $\lambda_1 = 0{,}041569$, $\lambda_2 = 0{,}056217$, V = 0,009785

sb118.indd 40 10.01.2018 9:29:14

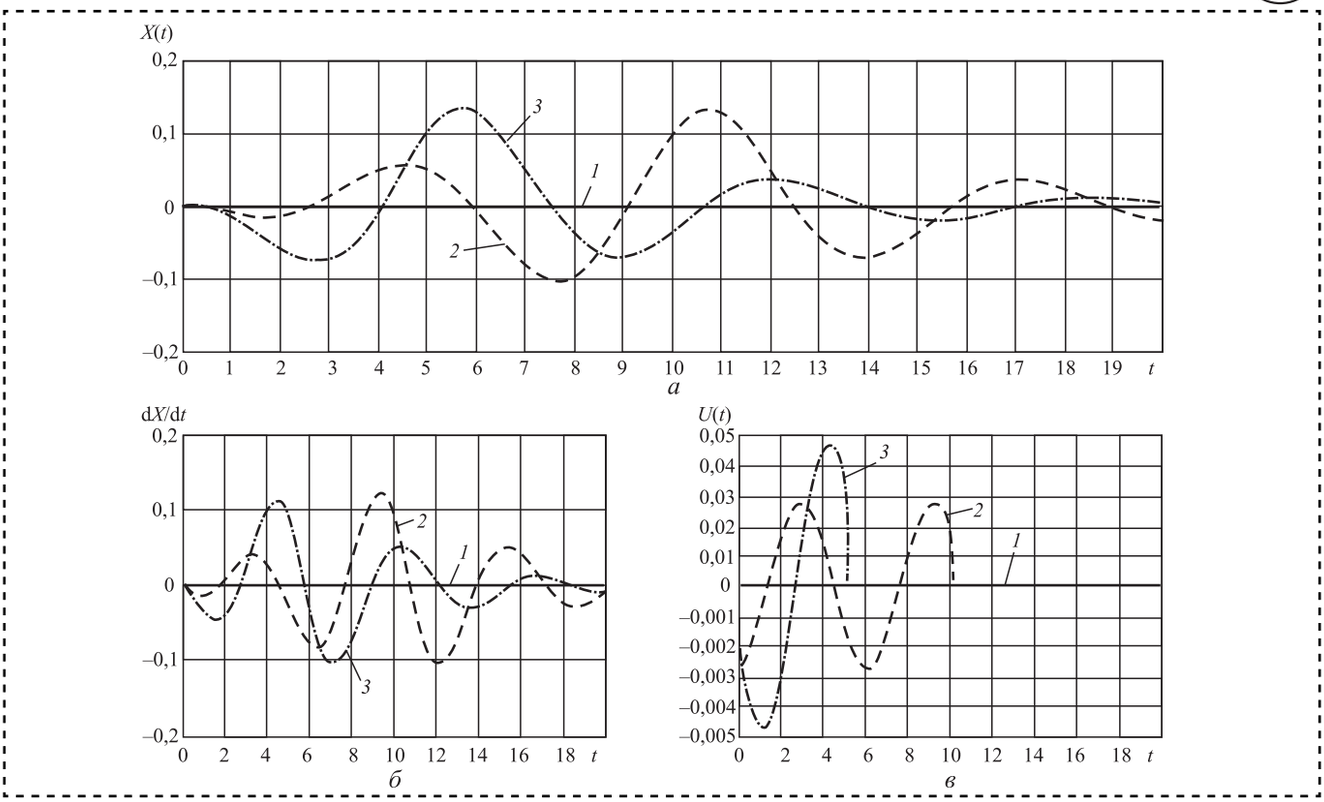


Рис. 2. Зависимости $X(t)$ (*а*), $\dot{X}(t)$ (*б*), $U(t)$ (*в*) перевода затухающих колебаний из состояния покоя для заданных значений T ($\omega_0 = 1$, $\gamma = 0{,}2$, $x_0 = 0$, $x_1 = 0$, $x_{0k} = 0{,}1$, $x_{1k} = 0{,}1$):
1 — $T = 20$; *2* — $T = 10$, $\lambda_1 = 0{,}020031$, $\lambda_2 = 0{,}019068$, V = 0,0038694; *3* — $T = 5$, $\lambda_1 = 0{,}031101$, $\lambda_2 = 0{,}035179$, V = 0,0065649

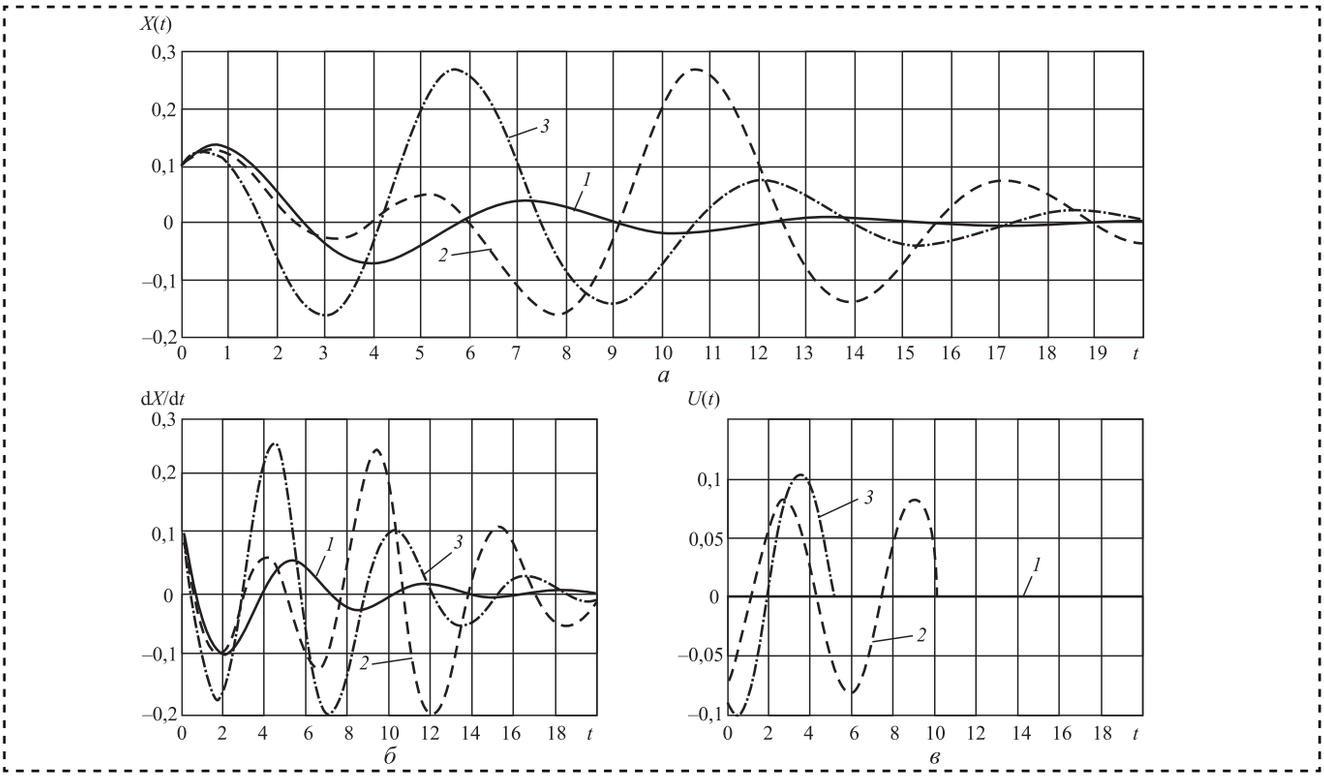


Рис. 3. Зависимости $X(t)$ (*а*), $\dot{X}(t)$ (*б*), $U(t)$ (*в*) перевода затухающих колебаний в конечное состояние с увеличенными в два раза начальными условиями для заданных значений T ($\omega_0 = 1$, $\gamma = 0{,}2$, $x_0 = 0{,}1$, $x_1 = 0{,}1$, $x_{0k} = 0{,}2$, $x_{1k} = 0{,}2$):
1 — $T = 20$; *2* — $T = 10$, $\lambda_1 = 0{,}066367$, $\lambda_2 = 0{,}048885$, V = 0,0034063; *3* — $T = 5$, $\lambda_1 = 0{,}10377$, $\lambda_2 = 0{,}014141$, V = 0,029849

sb118.indd 41 10.01.2018 9:29:15

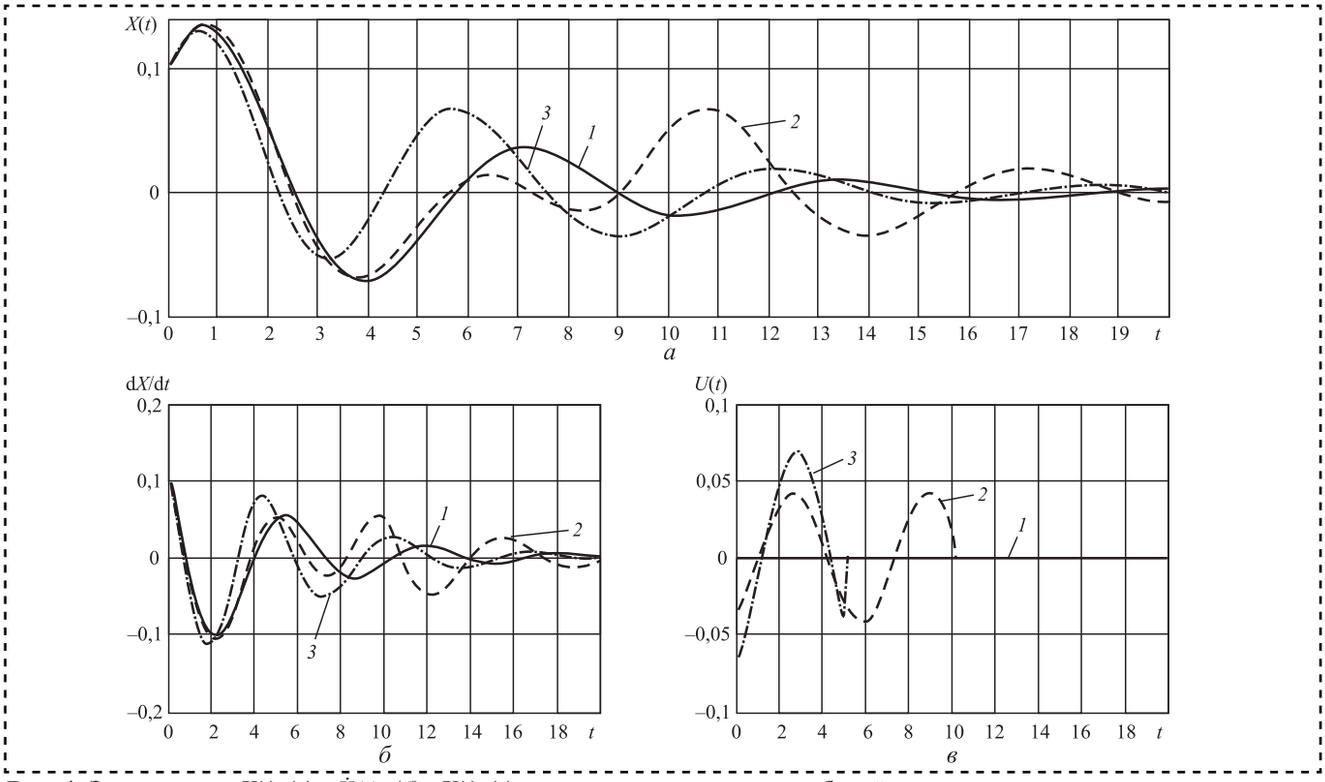


Рис. 4. Зависимости *X*(*t*) (*а*), $\dot{X}(t)$ (*б*), *U*(*t*) (*в*) перевода затухающих колебаний в конечное состояние с уменьшенными в 2 раза начальными условиями для заданных значений *T* (ω_0 = 1, γ = 0,2, x_0 = 0,1, x_1 = 0,1, x_{0k} = 0,05, x_{1k} = 0,05):
1 — *T* = 20; *2* — *T* = 10, λ_1 = 0,03632, λ_2 = 0,020284, V = 0,0085956; *3* — *T* = 5, λ_1 = 0,057119, λ_2 = 0,038627, V = 0,0098774

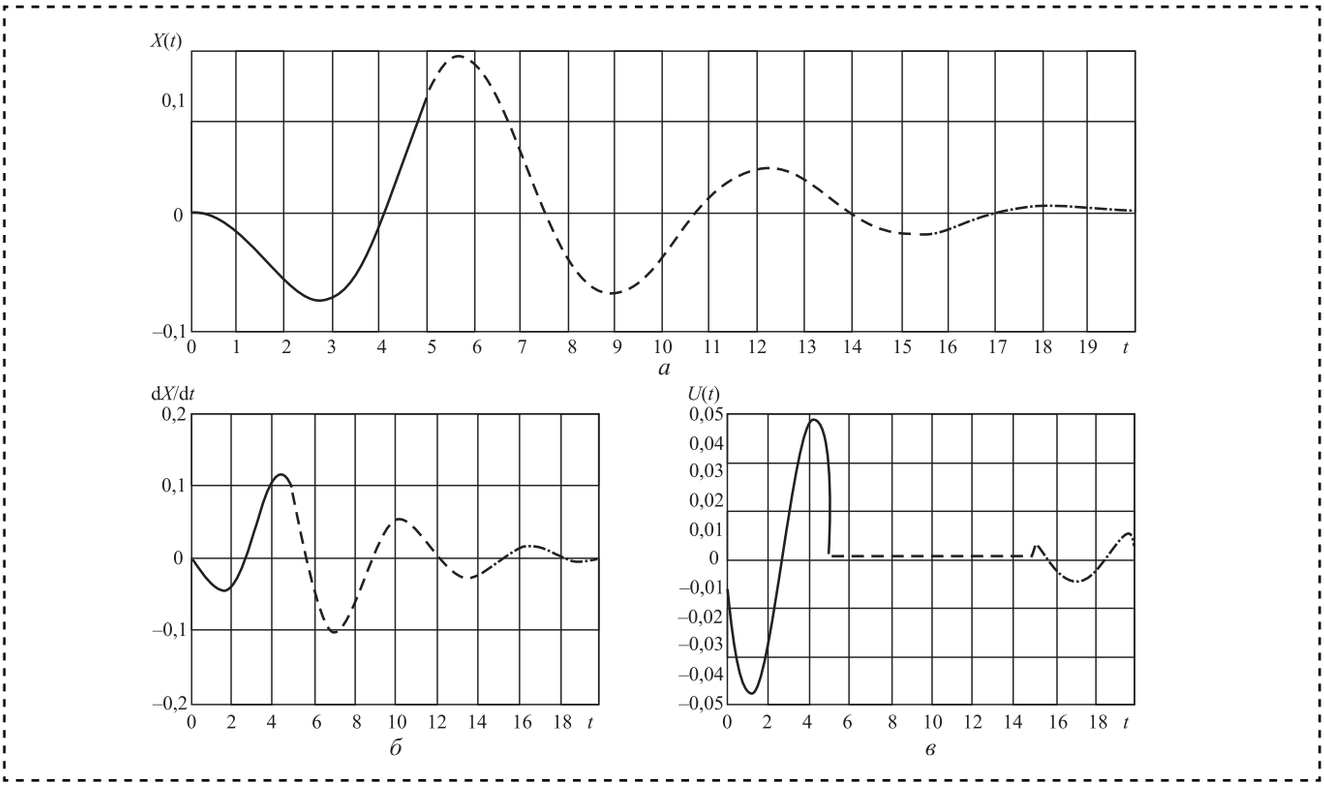


Рис. 5. Зависимости *X*(*t*) (*а*), $\dot{X}(t)$ (*б*), *U*(*t*) (*в*) перевода затухающих колебаний при двухкратном применении управляющего воздействия на время *T* = 5 (ω_0 = 1, γ = 0,2, x_{0k} = 0,1, x_{1k} = 0,1):
— — T_n = 0; T_k = 5, λ_1 = 0,031101, λ_2 = 0,035179; — — — T_n = 5; T_k = 15, λ_1 = 0, λ_2 = 0; —·— — T_n = 15; T_k = 20, λ_1 = 0,0028008, λ_2 = 0,0085347

sb118.indd 42 10.01.2018 9:29:15

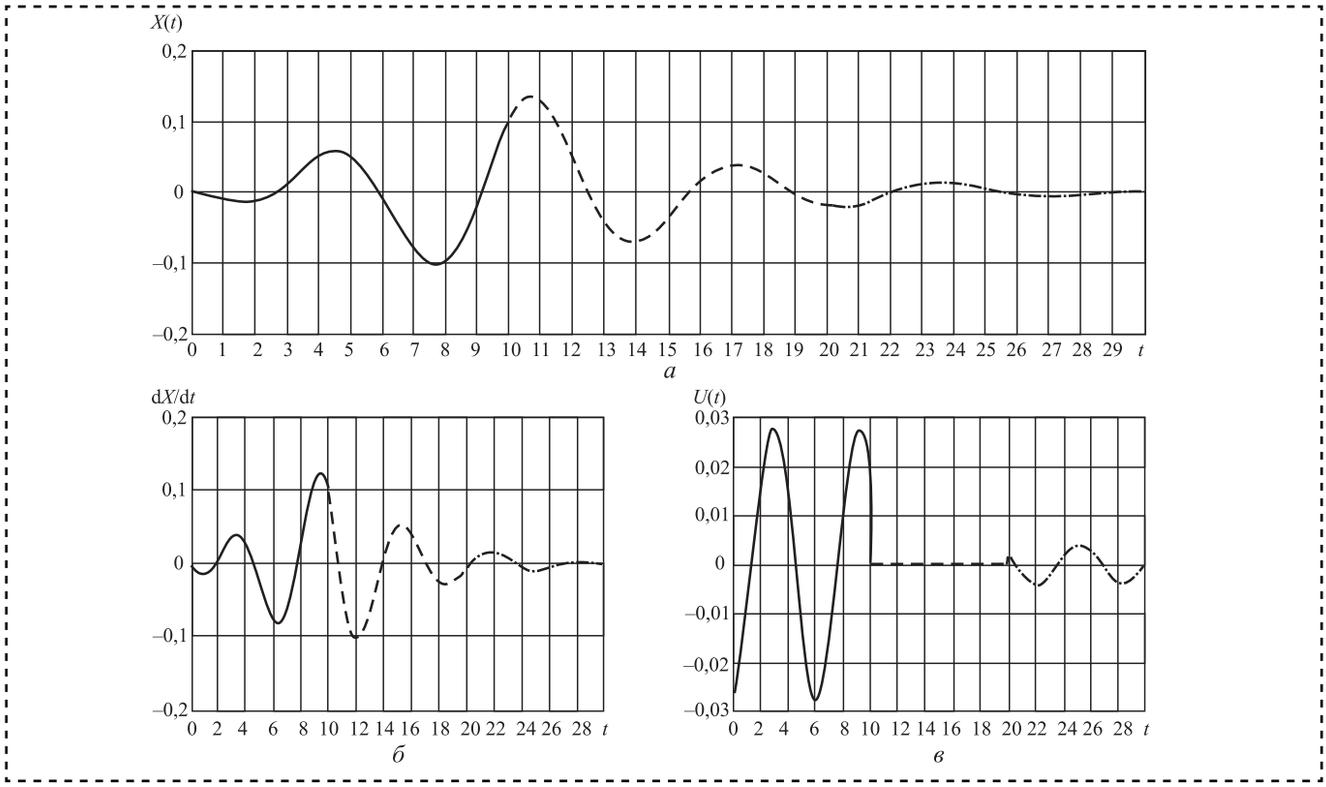


Рис. 6. Зависимости *X*(*t*) (*а*), $\dot{X}(t)$ (*б*), *U*(*t*) (*в*) перевода затухающих колебаний при двухкратном применении управляющего воздействия за время *T* = 10 (ω_0 = 1, γ = 0,2, x_{0k} = 0,1, x_{1k} = 0,1):
— — T_n = 0; T_k = 10, λ_1 = 0,020031, λ_2 = 0,019068; — — — T_n = 10; T_k = 20, λ_1 = 0, λ_2 = 0; —·— — T_n = 20; T_k = 30, λ_1 = 0,0040209, λ_2 = 0,00015922

Параметры колебаний: собственная частота колебаний ω_0 = 1,0 и коэффициент затухания силы трения γ = 0,2.

Сплошная кривая на рис. 1—4 при заданном времени T = 20 рассчитана без действия управляющего воздействия (U = 0, V = 0). Остальные кривые — соответствуют временам перехода в другое состояние T = 10 и T = 5.

Полученные результаты позволяют утверждать, что разработанная методика достаточно эффективно изменяет состояние гармонических колебаний в желаемом направлении, а также позволяет определять потребную интенсивность управляющего воздействия и, следовательно, мощность воздействия.

Многократное применение управляющего воздействия значительно расширяет возможности методики по изменению состояния гармонических колебаний. На рис. 5, 6 приведен вариант расчета с применением закона управляющего воздействия два раза.

Расчет состоит из трех шагов:

1. Система находится в покое $(x_0 = 0,\ \dot{x}_0 = 0)$. Включается управляющее воздействие первый раз. Перевод системы в состояние x_k = 0,1, $\dot{x}_k$ = 0,1 за время T = 5 (T = 10).

2. Система находится в обычном режиме. Управляющее воздействие отключено.

3. Повторное включение управляющего воздействия на время T = 5 (T = 10) снова переводит систему в состояние покоя.

Выводы

1. Разработана методика изменения состояния собственных и затухающих гармонических колебаний в заданное время путем введения оптимального закона управляющего воздействия, зависящего только от времени. Структура и параметры управляющего воздействия определены на основе методов теории оптимального управления.

2. Вариант многократного применения оптимального закона управляющего воздействия расширяет возможности предлагаемой методики.

3. Приведенные расчеты различных вариантов использования методики подтверждают ее эффективность.

Библиографический список

1. **Эрлих Б.М.** Перевод гармонических колебаний в состояние покоя // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 9 (18). С. 421—426.

2. **Красовский Н.Н.** Теория управления движением. Линейные системы. М.: Наука, 1968. 476 с.

sb118.indd 43 10.01.2018 9:29:15

УДК 004.42

Ю.Н. Можегова, *канд. техн. наук,* **И.Н. Марихов**
(Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева)
E-mail: kandy2701@mail.ru

Программное обеспечение для автоматизированного проектирования пневмоцилиндров в САПР КОМПАС-3D

Представлено программное обеспечение для автоматизированного расчета конструктивных параметров и построения моделей и чертежей пневмоцилиндров в САПР КОМПАС-3D.

The software developed for the automated calculation of design parameters and construction of models and drawings of air actuators in CAD COMPASS — 3D is presented.

Ключевые слова: программное обеспечение, пневмоцилиндр, модель.

Keywords: software, air actuator, model.

В машиностроении при проектировании изделий широко применяют системы автоматизированного проектирования, позволяющие не только оформлять конструкторско-технологическую документацию, но и создавать трехмерные модели, проводить тепловой и прочностной расчеты конструкций и писать управляющие программы для станков с ЧПУ.

Во многих CAD-системах имеются библиотеки стандартных изделий, позволяющие упростить и ускорить работу конструктора.

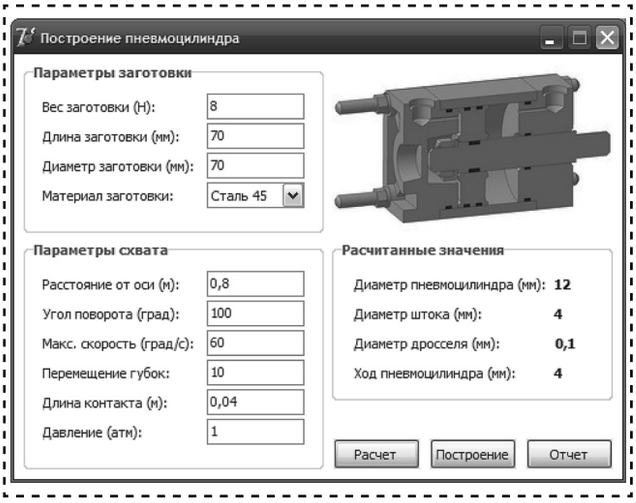


Рис. 1. Главное окно программы с результатами расчета

В большинстве сборочных приспособлений, приспособлений для металлорежущих станков используют гидро- и пневмоприводы. Поэтому автоматизированное проектирование пневмоцилиндров (ПЦ) является актуальной задачей.

При запуске разработанного программного продукта KompasBuild.exe для автоматизированного построения пневмоцилиндра согласно расчетным данным открывается главное окно программы. Оно состоит из полей ввода параметров заготовки, параметров схвата, области вывода результатов расчета: диаметра ПЦ, диаметра штока, хода ПЦ, диаметра дросселя.

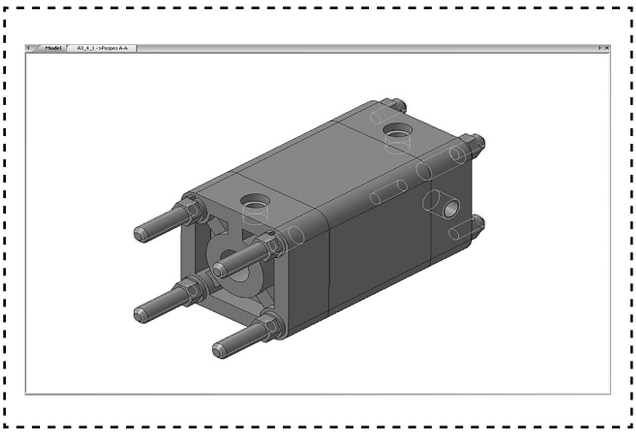


Рис. 2. Трехмерная модель пневмоцилиндра

sb118.indd 44 10.01.2018 9:29:16

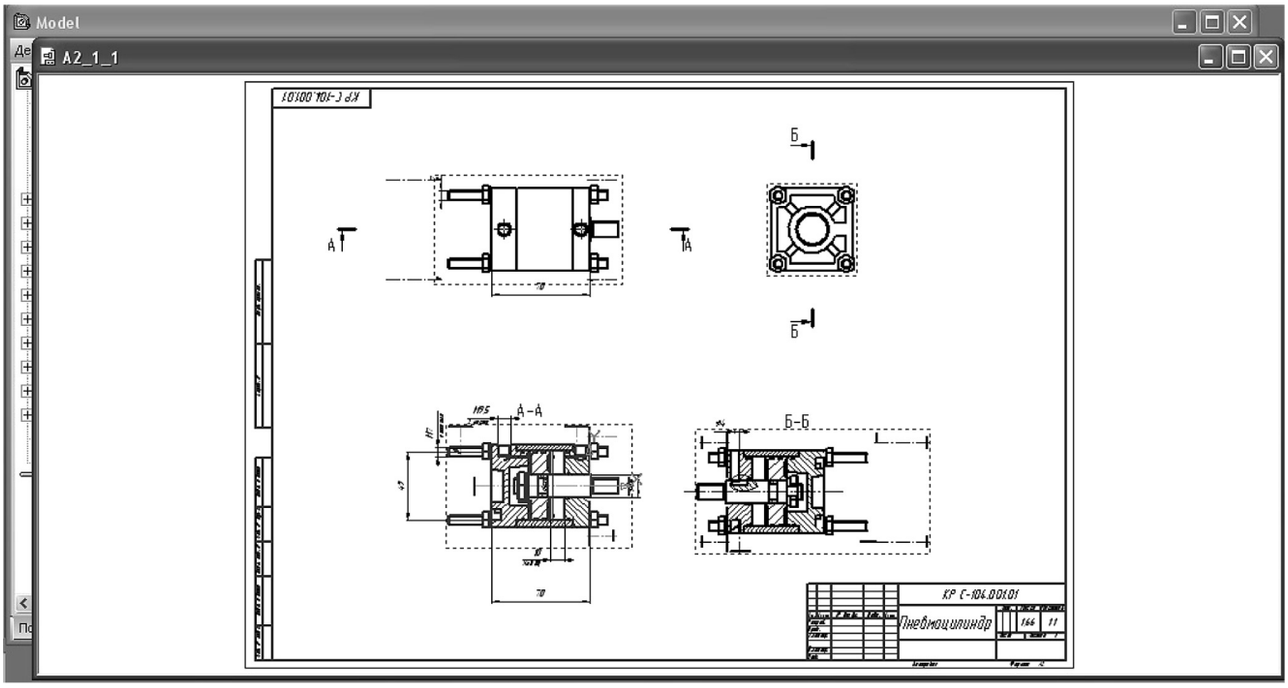


Рис. 3. Автоматическое построение чертежа пневмоцилиндра

При нажатии кнопки "Расчет" вычисляются основные параметры ПЦ и становится активной кнопка "Построение" (рис. 1).

Для создания чертежа и модели приспособления созданы шаблоны ПЦ. При нажатии кнопки "Построение" расчетные данные передаются в 3D-сборку в системе КОМПАС-3D, перестраивается шаблонная модель (рис. 2), а также, после подтверждения перестроения чертежа, запускается КОМПАС-3D.

При выборе окна 3D-модели пневмоцилиндра следует утвердительно ответить на запрос системы на повторное перестроение чертежа, чтобы избежать возможного разрыва ассоциативных связей чертежа.

Для создания чертежа в программе предусмотрено два шаблона формата А2 масштаба 1:1 и формата А3 масштаба 4:1, которые выбираются программой на основе габаритных размеров пневмоцилиндра (рис. 3).

Пользователь может самостоятельно настроить масштаб ассоциативных видов, скрыть или не разрезать какие-либо узлы пневмоцилиндра, изменять формат листа на основе стандартных средств КОМПАС-3D.

При нажатии кнопки "Отчет" генерируется файл с основными расчетами в MS Word.

Таким образом, предлагаемое программное обеспечение позволяет в автоматизированном режиме рассчитывать пневмоцилиндры и получать их чертежи и трехмерное изображение в САПР КОМПАС-3D.

Библиографический список

1. **Можегова Ю.Н., Князева И.А.** Автоматизированное проектирование инструмента для изготовления изделий машиностроения // Сборка в машиностроении, приборостроении. № 6, 2015. С. 33—37.

2. **Матросова Ю.Н., Краснов Е.С.** Программное обеспечение для автоматизированного проектирования приспособлений станков фрезерной группы в САПР "КОМПАС-3D" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 8. С. 38—40.

3. **Матросова Ю.Н., Храмова Е.И.** Программное обеспечение для автоматизированного проектирования приспособлений к станкам сверлильной группы в САПР "КОМПАС-3D" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 4. С. 40—43.

sb118.indd 45 10.01.2018 9:29:16

ИНФОРМАЦИЯ

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2017 ГОДУ

№

Ресурс машин и конструкций

Гоцеридзе Р.М. Надежность приборов 4
Пестерев Д.А., Михайловский И.А., Касаткина Е.Г., Бережной К.Н. Методика квалиметрической оценки 4

Экономика и организация сборочного производства

Дубовик Е.А. Обобщенный критерий оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки селектора всеволнового СКВ-301 8
Любишкина О.В., Курнасова Я.Л. Оптимизация времени сборки специальных изделий с использованием теории графов 10
Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю. Обеспечение эффективного выполнения сборочных операций высокоточных изделий 5

Технологичность конструкции

Антонец И.В. Весоизмерительное устройство с силовой компенсацией деформации упругого кольца поворотом постоянного магнита 6
Вавилов В.Е. Новый метод проектирования электромеханических преобразователей энергии с использованием генетических алгоритмов . . 10
Вайцехович С.М., Панов Д.В., Лебедев А.Н., Скрыльникова А.Г. Водо-водяные подогреватели с использованием спирально-профильных труб для индивидуальных тепловых пунктов 1
Коднянко В.А., Курзаков А.С. Статические и динамические характеристики осевой гидростатической опоры с мембранным компенсатором перемещения 2
Коднянко В.А., Курзаков А.С. Улучшение динамических показателей кругового газостатического подпятника с кольцевыми диафрагмами . . . 11
Крыхтин Ю.И., Карлов В.И. Привод управления заслонкой водометного движителя плавающей машины 1
Потапов В.В. Алгоритмы взаимосвязи утечки и функциональных параметров обеспечения герметичности подвижных уплотнений валов роторного оборудования систем безопасности контайнмента реактора 4
Руднева Л.Ю. Повышение эксплуатационных характеристик высокоточных агрегатов и приборов, основанное на технологии сборки деталей по принципу равножесткости 1
Топоров А.В., Пучков П.В., Полетаев В.А., Кропотова Н.А., Киселев В.В. Применение сжатого газа для привода гидравлического инструмента . . . 8
Шишкарев М.П. Модернизация адаптивной фрикционной муфты с бифункциональным управляющим устройством 3

Сборочное оборудование и его элементы

Вайцехович С.М., Кривенко Г.Г., Овечкин Л.М. Разработка нестандартного оборудования в решении задач импортозамещения в заготовительном производстве 5

Современные технологии сборки

Водолазская Н.В. Силовой анализ процесса сборки резьбовых соединений при симметричной затяжке крепежных деталей 11

№

Технологическая оснастка для сборки

Гоцеридзе Р.М. Статическая балансировка подвижных частей приборов 6
Шаломов В.И. Исследование влияния конструктивных особенностей газовых опор на эксплуатационные характеристики шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков . . . 1, 2, 3, 4

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Бахматов П.В., Муравьев В.И. Особенности оценки влияния термического цикла сварки титановых сплавов на остаточные напряжения и коробление сварных изделий 2
Бохоров И.О., Карабанов В.В. Методика разработки индуктора и условий индукционной пайки труб 3
Демичев С.Ф., Вашуков Ю.А., Наумов Л.А., Рясный А.В. Совершенствование процесса изготовления неразъемных узлов из разнородных материалов 9

Сборка с использованием клеев

Игнатов А.В., Винокурова М.Э. Инновационный метод сборки регулируемых цилиндрических клеевых соединений 6
Игнатов А.В., Винокурова М.Э. Оригинальная технология сборки регулируемых цилиндрических клеевых соединений 8

Транспортирование объектов сборки

Федоров В.А., Калмыков В.В., Малышев Е.Н. Применение крючковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств в многономенклатурном сборочном производстве 10

Питание сборочных линий. Комплектация. Складирование. Упаковка

Сорокин М.Н. Метод расширения потока для решения трехпараметрической задачи комплектования 12
Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Свойства задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал—втулка" 1

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Балтаев Т.А. Математическое моделирование процесса ультразвуковой стабилизации деформации упругих чувствительных элементов типа круглых пластин, применяемых в датчиках давления 2
Березин С.Я., Карпов А.Р. Динамическая устойчивость шпилечных соединений с волнистым резьбовым профилем 12
Волков В.М., Должиков С.Н., Лакеенко М.Н. Контроль биения зубчатых колес тяговой передачи локомотива 11
Гоцеридзе Р.М. Динамическая балансировка подвижных частей приборов 5
Громаковский Д.Г., Коптев А.А., Крышень Е.В., Шигин С.В. Кавитационная установка для мойки внутренних поверхностей трубчатых деталей 6
Дунаев В.В., Пучков В.Н. Теория и оценка релаксации силы затяжки болтовых соединений при повышенных температурах 11, 12

sb118.indd 46 10.01.2018 9:29:16

№

Есаулов В.В., Шашков А.Ю., Колосков А.В., Рожко Т.Е. Дериватографические исследования компаунда "Герсил-312" и методика определения необходимой концентрации его катализатора 3
Королев А.В., Балаев А.Ф., Яковишин А.С. Обеспечение качества подшипников качения на основе применения технологии многоциклового нагружения 7
Кузнецова С.В. Распознавание угловой ориентации детали при автоматизированной сборке с помощью систем технического зрения 5
Микаева С.А., Микаева А.С., Горбунов А.А. Повышение качества и экологичности при сборке люминесцентных ламп 8
Можегова Ю.Н., Марихов И.Н. Точность автоматизированного неразрушающего контроля пористости материалов 9
Потапов В.В. Герметичность систем безопасности АЭС 6

Разборка. Ремонт

Дубовик Е.А. Сборка и разборка шатунно-поршневой группы машин 10

Соединение деталей машин

Березин С.Я. Технологические принципы получения резьбовых соединений с натягом на основе сопрягаемых деталей с винтовой нарезкой волнистого профиля 11
Гошко А.И. Мониторинг требований к точности уплотнений разъемных герметичных соединений систем безопасности контайнмента реактора 7

Экология и безопасность сборочных работ

Гоцеридзе Р.М., Уразаев З.Ф. Технологический микроклимат сборочных цехов 1
Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И. Сборка установки очистки воздуха 7

Трение и смазка в машинах и механизмах

Адашкевич Ю.П. Проскальзывание, протаскивание, проворачивание шаров в шариковом подшипнике 5
Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Василенко В.В. Клиновидные опоры скольжения, работающие на микрополярном смазочном материале, обусловленном расплавом направляющей, с учетом зависимости вязкости от давления 11
Берент В.Я. Процессы, происходящие на поверхностях трения сильноточного скользящего контакта 2
Берент В.Я., Берент В.В. Целесообразность использования металлокерамических тормозных колодок 8
Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новиков В.В., Новикова О.О. Технологические методы повышения смазочного действия нанодисперсных магнитных масел . . . 8
Буланов Э.А. Давление сыпучего тела на стенки силоса. Пространственная задача 5
Булгаревич С.Б., Бойко М.В. Активация и дезактивация трением физико-химических процессов в зоне фрикционного контакта 9
Буракова М.А., Колесников И.В., Мелешко О.И., Шведов А.Ю. Повышение качества работ по виброуплотнению балласта 12
Гурьянов Г.Н. Аналитические зависимости для расчета прироста осевого напряжения от действия противонатяжения при волочении круглого сплошного профиля 5

№

Гурьянов Г.Н. Оценка качества технологической смазки для волочения круглого сплошного профиля 8
Дубовик Е.А. Устойчивость масел к износу 3
Емаев И.И., Криони Н.К., Нигматуллин Р.Г., Шустер Л.Ш. Влияние состояния модификатора на триботехнические характеристики пластичной смазки в различных температурно-силовых условиях трения 9
Емельянов С.Г., Селезнев Ю.Н., Губанов В.С., Кочергин В.С., Хомутов Р.Н. Исследование температуры рабочей зоны при протягивании фасонных отверстий 12
Иванова Т.В., Налабордин Д.Г. Сравнительная оценка интенсивности износа гребней стандартных и инновационных колес грузовых вагонов 10
Иванова Т.В., Петровых В.А., Налабордин Д.Г. Определение износа гребня колеса грузового вагона . . . 1
Ивасышин Г.С. Приложения квантовой механики. Аттосекундные процессы в микро-, нано-, пико- и фемтотрибологии 8
Измайлов В.В., Гусев А.Ф. Фрикционные характеристики контакта и карты режимов трения 3
Израилович М.Я., Эрлих Б.М., Рочагов А.В. Активное гашение фрикционных автоколебаний с учетом запаздывания виброгасящего воздействия 1
Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Бекузин В.И., Айгузина В.В. Удельные потери сплава 49К2ФА в магнитопроводе статора ЭМПЭ 6
Колесников В.И., Бардушкин В.В., Колесников И.В., Мясников Ф.В., Сычев А.П., Яковлев В.Б. Прогнозирование эксплуатационных упругих свойств трибокомпозитов с микрокапсулами, заполненными жидкой смазкой 9
Королёв П.В., Шилов М.А., Королева С.В., Королев В.В. Модель прогнозирования физико-механических параметров нанокомпозиционных материалов в условиях трибоконтакта 7
Кохановский В.А., Иванов С.И., Петренко А.А. Конструкция антифрикционных фторопластсодержащих композиционных покрытий 10
Криони Н.К., Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р. Изнашивание режущего инструмента с многослойными композиционными покрытиями . . 4
Махкамов К.Х., Мамасалиева М.И., Жураева Г.Ш. Энергетический баланс контактного взаимодействия при изнашивании материалов в потоке твердых абразивных частиц 6
Меделяев И.А. Подбор металлических антифрикционных материалов для трибосопряжений технических систем 12
Меделяев И.А., Сорокин А.А., Волобуев А.В. Трибология сталей и сплавов при смешанной смазке в узлах трения технических систем 2
Мигранов М.Ш., Дементьева М.С., Мигранов А.М. Исследование износостойкости режущего инструмента при сухом электростатическом охлаждении . . . 6
Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Гармонина А.Н. Расчетная модель упорного подшипника с податливой опорной поверхностью 12
Ноженков М.В. Квантовые потоки как вихревые сверхструктуры 3
Полетаев В.А., Топоров А.В., Покровский А.А., Зарубин В.П. Разработка новых конструкций комбинированных магнитожидкостных уплотнений . . . 1
Полетаев В.А., Шпенькова Е.В., Голяс А.А. Исследование механических характеристик поверхностного слоя деталей электронасосов, упрочненных алмазным выглаживанием 7
Поляков С.А., Гончаров С.Ю., Лычагин В.В., Климов А.Ю., Куц М.С. Анализ контактного взаимодействия в червячных передачах в связи с разработкой модели их нелинейных колебаний . . . 11

sb118.indd 47 10.01.2018 9:29:16

Русин Н.М., Скоренцев А.Л., Власов И.В. Формирование слоя переноса при сухом трении сплава Al—Sn по стали 9
Салахов Т.З., Мигранов М.Ш., Нигматуллин Р.Г. Увеличение эффективности технического обслуживания промышленного оборудования на основе анализа состояния масла 10
Труханов В.М., Крыхтин Ю.И., Романовский А.С. Технологические основы разработки и изготовления заготовок фрикционных дисков с молибденовым газотермическим покрытием 6
Труханов В.М., Крыхтин Ю.И., Романовский А.С. Физические основы разработки заготовок фрикционных дисков с комбинированной поверхностью трения с молибденовым газотермическим покрытием для повышения надежности работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин . . . 4
Хопин П.Н. Исследование периода приработки пар трения с твердосмазочными покрытиями в нормальных атмосферных условиях 6
Хопин П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в условиях вакуума на основе термокорреляционных зависимостей 7
Хопин П.Н. Термокорреляционная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями для нормальных атмосферных условий 5
Чернов Л.К., Полетаев В.А. Повышение эффективности магнитной галтовки 12
Шалыгин М.Г., Кокунов В.А., Лукавый А.П., Еловиков А.Б. Деформационно-адгезионное изнашивание нанонеровностей поверхностей трения мартенситных сталей 2
Шишкарев М.П., Чан Ван Дык. Элементы теории тепловых процессов в адаптивной фрикционной муфте с раздельным силовым замыканием . 6
Шмидт А.А., Володин И.М. Подбор смазки с учетом коэффициента трения для вытяжки деталей из высокопрочной стали 7
Щедрин А.В., Алешин В.Ф., Бодарева А.В., Климочкин К.О., Поляков А.О., Косарев И.В. Формулы для прогнозирования силы комбинированного дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях применения металлоплакирующих смазок 11
Эрлих Б.М. Перевод гармонических колебаний в состояние покоя 9

В помощь конструктору, технологу

Байнева И.И. Компьютерное моделирование и конструирование светодиодного светильника с автономным источником питания 10
Денисенко А.Ф., Назаров Н.С. Формирование регрессионной модели контактного термического сопротивления плоских соединений шпиндельных узлов 7
Житников Ю.З., Пискунов В.В. Обоснование погрешностей относительного смещения осей соединяемых деталей при роботизированной сборке . . . 7
Калачёв О.Н., Гушан Д.Ф. Программное создание 3D-модели сборки УСП планшайбы средствами NX Open API в CAD/CAM NX 11
Матрёнин А.В., Микаева С.А. Пышение качества и техника безопасности производства установок обеззараживания воды 10
Можегова Ю.Н. Программное обеспечение для оценки функционирования элементов коробки скоростей металлорежущих станков 12
Можегова Ю.Н., Марихов И.Н. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования пальцевой фасонной фрезы для эвольвентной винтовой шестерни 10
Разумов М.С., Гридин Д.С. Выбор технологической схемы сборки планетарного редуктора с шевронным зацеплением 1
Самаркин А.И., Самаркина Е.И., Дмитриев С.И., Евгеньева Е.А. Автоматизированное проектирование средств технологического оснащения 4
Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В. Прочность металлокомпозитных узлов при магнитно-импульсной сборке 7
Чеботарев Е.А., Губарев П.В., Глазунов Д.В. Повышение надежности тяговой зубчатой передачи грузовых электровозов 8
Шишкарев М.П. Влияние коэффициента усиления на массу адаптивных фрикционных муфт . . 2
Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Пронин А.И., Щелкунова М.Е. Применение шаблонов вычислений при проектировании механизмов параллельной структуры 7
Ярошик Д.В., Кристаль М.Г. Особенности интеграции Microsoft Excel с Esteco ModeFrontier при моделировании тепловых расчетов гидроакустических приборов 12

Информация

Белов Е.В. Правила отбора пружин процесса сборки клапанов в изделии 4
Буяновский И.А., Зеленская М.Н., Самусенко В.Д., Павелко Г.Ф. XI Международная научно-техническая конференция "Трибология — машиностроению" 2
Указатель статей, опубликованных в 2017 году 1

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 08.11.2017. Подписано в печать 27.12.2017. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

sb118.indd 48 10.01.2018 9:29:16