

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

2017    Том 18  
6 (203)

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Технологичность конструкции

Антонец И.В. Весоизмерительное устройство с силовой компенсацией деформации упругого кольца поворотом постоянного магнита ..... 243

#### Технологическая оснастка для сборки

Гоцеридзе Р.М. Статическая балансировка подвижных частей приборов ..... 246

#### Сборка с использованием kleev

Игнатов А.В., Винокурова М.Э. Инновационный метод сборки регулируемых цилиндрических kleев ..... 250

#### Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Потапов В.В. Герметичность систем безопасности АЭС ..... 257

Громаковский Д.Г., Коптев А.А., Крышень Е.В., Шигин С.В. Кавитационная установка для мойки внутренних поверхностей трубчатых деталей ..... 262

#### Трение и смазка в машинах и механизмах

Мигранов М.Ш., Дементьева М.С., Мигранов А.М. Исследование износостойкости режущего инструмента при сухом электростатическом охлаждении ..... 265

Хопин П.Н. Исследование периода приработки пар трения с твердосмазочными покрытиями в нормальных атмосферных условиях ..... 269

Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Бекузин В.И., Айгузина В.В. Удельные потери сплава 49К2ФА в магнитопроводе статора ЭМПЭ ..... 274

Труханов В.М., Крыхтин Ю.И., Романовский А.С. Технологические основы разработки и изготовления заготовок фрикционных дисков с молибденовым газотермическим покрытием ..... 276

Шишкарев М.П., Чан Ван Дык. Элементы теории тепловых процессов в аддитивной фрикционной муфте с раздельным силовым замыканием ..... 281

Махкамов К.Х., Мамасалиева М.И., Жураева Г.Ш. Энергетический баланс контактного взаимодействия при изнашивании материалов в потоке твердых абразивных частиц ..... 286

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" — 79748, Объединенному каталогу "Пресса России" — 84967, каталогу "Почта России" — 60257) или непосредственно в издательстве

Тел.: 8 (499) 269-54-98

E-mail: sborka@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. БАРДУШИН, 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, д.т.н.,  
чл.-кор. РАН

А.А. СУПОНИН, к.т.н.

##### ВОЛГОГРАД

В.Г. КАРАБАНЬ, к.т.н., доц.  
М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.  
В.И. ЛЫСАК, д.т.н., проф.,  
чл.-кор. 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. ХИСАМУДДИНОВ, к.т.н.

##### НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

##### ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

##### ОРЕЛ

Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.

Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.

##### ОРЕНОBURГ

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.

#### Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н.

Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

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

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*

2017 **Vol. 18**  
**6 (203)**

### CONTENTS

#### *Manufacturability of a construction*

- Antonov I.V.** Load measuring device with the power compensation of the deformation of the elastic ring by the rotation of the permanent magnet ..... 243

#### *Technological equipment for assembly*

- Gotseridze R.M.** Moving armature static balancing ..... 246

#### *Assembly with use glue*

- Ignatov A.V., Vinokurova M.E.** Innovative method of assembly of adjustable cylindrical adhesive joints ..... 250

#### *Production tools and machinery for assembly*

- Potapov V.V.** Tightness of security systems of the NPP ..... 257  
**Gromakovskiy D.G., Koptev A.A., Kryshen E.V., Shigin S.V.** Cavitation installation for washing the internal surfaces of the tubular parts ..... 262

#### *Friction & lubrication in machines and mechanisms*

- Migranov M.Sh., Dementyeva M.S., Migranov A.M.** Study of wear resistance of cutting tools in dry electrostatic cooling ..... 265  
**Khopin P.N.** Research of the period extra earnings of couples of friction with the solid lubricating coatings in the conditions of the normal atmosphere ..... 269  
**Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Bekuzin V.I., Ajguzina V.V.** Specific losses alloy 49K2FA in the magnetic stator EMCE ..... 274  
**Trukhanov V.M., Krykhtin Yu.I., Romanovsky A.S.** Technological fundamental for development and production of friction disks' stocks with a molybdenic gas-thermal coating ..... 276  
**Shishkarev M.P., Tran Van Duc.** Elements of the theory of thermal processes in adaptive friction the clutch with a separate power circuit ..... 281  
**Mahkamov K.Kh., Mamasalieva M.I., Zhuraeva G.Sh.** Energy balance of the contact interaction in the wear of materials in flow of the hard abrasive particles ..... 286

Journal is distributed on subscription, which can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency — 79748, the union catalogue "Pressa Rossii" — 84967, the catalogue "Pochta Rossii" — 60257) or directly in editorial of the journal.

Ph.: 8 (499) 269-54-98

<http://www.mashin.ru> E-mail: sborka@machin.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. VASILEV  
(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**  
V.G. KARABAN'  
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  
**OMSK**  
V.N. KOSTYUKOV  
**OREL**  
Yu.S. STEPANOV  
G.A. KHARLAMOV  
**ORENBURG**  
A.N. POLYAKOV  
A.I. SERDUK  
A.P. FOT  
**PERM**  
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. NUZHINA, I.M. GLIKMAN

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

# ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ

УДК 681.26

**И.В. Антонец**, д-р техн. наук (Ульяновский институт гражданской авиации имени главного маршала авиации Б.П. Бугаева)  
E-mail: iv.antonec@yandex.ru

## Весоизмерительное устройство с силовой компенсацией деформации упругого кольца поворотом постоянного магнита

Рассмотрена принципиально новая конструкция весоизмерительного устройства, в которой силовая компенсация внешней нагрузки осуществляется с помощью поворотного постоянного магнита. Она лишена недостатков весоизмерителя компенсационного типа: остаточных напряжений; нелинейности; упругих несовершенств материала; температурных колебаний и т.п.

*Essentially new design of weighing devices in which power compensation of external load is carried out using a rotary permanent magnet is considered. She is devoid of the disadvantages weighing system compensation type: residual tension, nonlinearity, elastic imperfections of material, temperature fluctuations, etc.*

**Ключевые слова:** кольцевой упругий элемент, чувствительный элемент, деформация, постоянный магнит, электродвигатель, обратная связь.

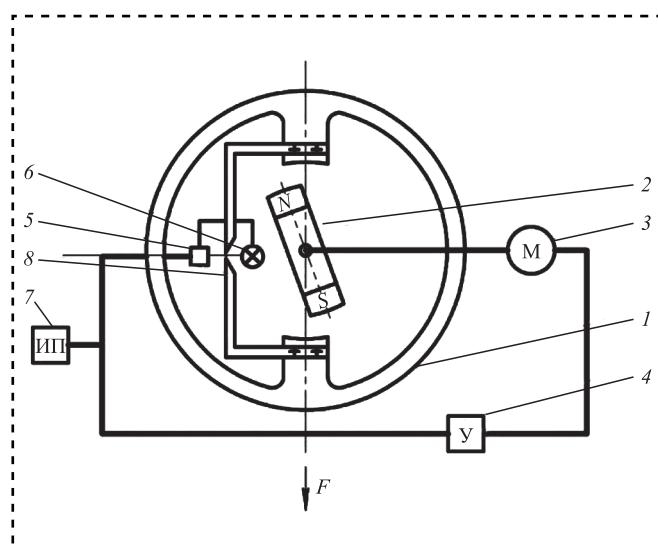
**Keywords:** elastic annular element, sensing element, deformation, permanent magnet, motor, feedback.

Весоизмерительные устройства — технические средства систем управления транспортно-складскими комплексами — осуществляют учет массы перемещаемых грузов и оптимизируют процесс перемещения, в частности, подъемно-транспортных механизмов периодического действия. Известные весоизмерительные устройства имеют низкую эффективность при эксплуатации из-за погрешностей датчиков при динамическом воздействии на них, сложности и продолжительности обслуживания, возникновения автоколебаний.

Упругие и прочностные свойства материала упругого чувствительного элемента (УЧЭ) должны быть не только достаточно высокими, но и постоянными во времени. С этой точки зрения качество УЧЭ и его параметрическая надежность в первую очередь зависят от гистерезиса, релаксации, ползучести и т.п. Именно эти погрешности, являясь причиной нестабильности показаний прибора во времени, часто ограничивают его точность.

Использование весоизмерительных устройств с силовой компенсацией деформации УЧЭ устра-

няет ряд недостатков. Инструментальные погрешности компенсационных весоизмерителей существенно ниже, чем в обычных пружинных, так как у них практически не возникает остаточной деформации УЧЭ. В разработанной ранее конструкции весоизмерительного устройства [1] за счет силовой компенсации внешней нагрузки электромагнитным устройством устраняется погрешность измерения, вызванная остаточной деформацией измерительного кольцевого упругого элемента. В следящей системе выходная величина воспроизводит изменение входной величины, причем автоматическое устройство реагирует на рассогласование, возникающее между выходной и входной величинами. Следящая система имеет обратную связь выхода со входом, которая служит для измерения результата действия системы. На входе системы проводится вычитание входного сигнала и сигнала с датчика обратной связи. Величина рассогласования воздействует на промежуточные устройства, а через них — на управляемый объект. Система работает так, чтобы все время сводить к нулю рассогласование.



**Схема весоизмерительного устройства, использующего систему стабилизации пространственного положения упругого кольца с поворотным магнитом:**

1 — кольцевой упругий элемент; 2 — постоянный магнит; 3 — двигатель; 4 — усилительное устройство; 5 — приемник излучения; 6 — источник излучения; 7 — измерительный прибор; 8 — шторки

Однако практические исследования разработанного компенсационного весоизмерителя показали, что он имеет следующие недостатки: большое энергопотребление, вызванное непрерывной подачей тока в катушки электромагнита на весь период весоизмерения; необходимость отвода тепла, выделяемого катушками, и стабилизации напряжения, которые влияют на точность измерения.

Для устранения перечисленных выше недостатков компенсационного весоизмерителя с электромагнитным приводом разработана конструкция весоизмерительного устройства [2], в которой силовая компенсация внешней нагрузки осуществляется с помощью поворотного постоянного магнита (рисунок). Устройство содержит измерительный кольцевой упругий элемент 1 с приливами, источник 6 и приемник 5 излучения, между которыми расположены шторки 8, закрепленные на противоположных приливах. Постоянный магнит 2 закреплен на выходном валу электродвигателя 3 и расположен в зазоре между приливыми измерительного кольцевого упругого элемента 1. Электродвигатель 3 через усилительное устройство 4 связан с приемником излучения 5, а измерительный прибор 7 позволяет установить начальное положение системы.

В исходном положении кольцевой упругий элемент 1 не деформирован, между шторками 8 отсутствует зазор, и сигнал с приемника 5 излучения отсутствует. При приложении силы на кольцевой упругий элемент 1 расстояние между приливыми кольцевого упругого элемента возрастает. Соответственно, зазор между шторками в первый момент увеличивается, при этом сигнал с приемника излучения также увеличивается и на выходе усилительного устройства появляется ток, приводящий к вращению выходного вала электродвигателя и постоянного магнита, закрепленного на валу, взаимодействуя с ферромагнитными приливыми, притягивая их и устраняя увеличение зазора. Чем меньше угол между осью постоянного магнита и вертикальной осью симметрии приливов, тем больше сила притяжения, которая при любых внешних нагрузках практически устраняет деформацию кольцевого упругого элемента. В этом случае внешняя сила пропорциональна углу поворота постоянного магнита, который и является результатом процесса измерения внешней нагрузки. При снятии нагрузки система возвращается в исходное состояние.

Практическое отсутствие деформации упругого элемента позволяет избавиться от целого ряда погрешностей: остаточной деформации, нелинейности, упругих несовершенств материала, температурных колебаний, воздействия линейных ускорений и вибраций, изменения свойств материала с течением времени и т.п. Устранение перечисленных погрешностей значительно уменьшит энергопотребление и повысит эффективность процесса взвешивания.

В настоящее время магнитные системы широко применяют в герметичных машинах и аппаратах (особенно на опасных производствах), обеспечивая полную герметичность внутреннего объема оборудования и защищая обслуживающий персонал и окружающую среду от воздействия вредных веществ. Основное функциональное назначение магнитных плоских систем — притяжение постоянных магнитов к ферромагнитным телам, причем сила притяжения тем больше, чем меньше воздушный зазор между магнитом и телом системы. Притяжение постоянных магнитов обусловливает необходимость в специальных прокладочных деталях из немагнитного материала в воздушном зазоре для исключения эффекта прилипания. Уже на стадии конструкторской разработки устройств не-



обходится определять значение силы притяжения постоянных магнитов. В магнитных системах применяют высококоэрцитивные постоянные магниты из сплавов редкоземельных элементов: самарий—cobальт (Sm—Co) и неодим—железо—бор (Nd—Fe—B).

Напряженность поля, создаваемая постоянным магнитом в рабочем зазоре

$$H = \frac{M_m}{\mu_0 r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi},$$

где  $M_m$  — магнитный момент магнита,  $M_m = I_h V_m$ ;

$I_h$  — намагниченность магнита (значение магнитной индукции по намагниченности в нейтрале магнита определяется по кривой размагничивания для каждого сплава);

$V_m$  — объем магнита;

$\varphi$  — угол между осью магнита и направлением напряженности магнитного поля;

$\mu_0$  — магнитная проницаемость в вакууме;

$r$  — расстояние до центра магнита,

$$r = x + \frac{l}{2 \cos \varphi};$$

$x$  — зазор между полюсом постоянного магнита и приливом УЧЭ;

$l$  — длина магнита.

Выражение для определения напряженности магнитного поля можно также записать следующим образом:

$$H = \frac{B_l V_m}{4 \pi \mu_0 \left( x + \frac{l}{2 \cos \varphi} \right)^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi},$$

где  $B_l$  — индукция в магните.

Следовательно, напряженность поля в точке считывания зависит от намагниченности, объема и формы магнита, а также от расстояния и угла его наклона по отношению к ферромагнитным приливам. Таким образом, сила притяжения должна определяться не только

вертикальным смещением, но и угловым наклоном.

Основная задача проектирования магнитных систем с постоянными магнитами — это выбор формы и размеров магнита и деталей магнитной арматуры (полюсных наконечников, сердечника и др.), обеспечивающих оптимальное соотношение параметров. Выбор критерия оптимальности определяется назначением магнитной системы. Наиболее часто в качестве критерия оптимальности принимают или энергию в рабочем зазоре, или магнитный момент. Однако это не исключает возможность использовать в качестве критериев оптимальности технологические и экономические показатели, значение которых особенно велико при проектировании магнитных систем из новых материалов.

Сила тяги магнитной системы с цилиндрическим магнитом (остаточная индукция материала 1 Тл) диаметром 40 мм, длиной 8,76 мм и зазором между магнитом и ярмом 0,1 мм достигает 909 Н [3]. В двусторонней системе новой конструкции сила тяги достигала 1800 Н. В качестве двигателя успешно зарекомендовали себя при испытаниях весоизмерительных систем шаговые двигатели, обеспечивающие угловую точность позиционирования менее 0,1°.

#### Библиографический список

1. Антонец И.В. Разработка конструкций весоизмерительных устройств на основе упругих чувствительных элементов, работающих в условиях силовой компенсации внешних нагрузок // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2015. № 5. С. 3—6.
2. Пат. 16430 РФ, МПК G 01 G 13/04. Весоизмерительное устройство / И.В. Антонец, Г.М. Горшков, С.М. Степанов. № 2015148340128; заявл. 10.11.2015; опубл. 27.08.2016. Бюл. № 24, 3 с.
3. Пятин Ю.М. Проектирование элементов измерительных приборов. М.: Высшая школа, 1977. 303 с.

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ СБОРКИ

УДК 681.2:658.5

Р.М. Гоцеридзе, канд. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
E-mail: mayex@yandex.ru

## Статическая балансировка подвижных частей приборов

Рассмотрены такие понятия, как неуравновешенность ротора, статическая балансировка, дисбаланс, главный вектор и главный момент дисбалансов ротора. Описаны методы определения и устранения статической неуравновешенности ротора на ножевых и шарикоподшипниковых опорах. Рассмотрены более точные методы определения статической неуравновешенности ротора: в шарикоподшипниковых опорах с созданием вибраций этих опор; в разновращающихся опорах, направления вращения которых периодически изменяются; у станков с использованием эффекта Жуковского.

Concepts such as rotor unbalance, static balancing, unbalance, the resultant vector and the resultant moment of rotor unbalances discusses. The article describes how to diagnose and eliminate rotor static unbalance at blade bearing and ball bearing assemblies. The more exact methods for determination of rotor static unbalance were analyzed, i.e. those in ball-bearing assemblies with creation of vibrations of these supporting elements; in differently rotating bearings, which direction of rotation alternates; at machines using Zhukovsky phenomena.

**Ключевые слова:** статическая балансировка, дисбаланс, методы статической балансировки, главные вектор и момент дисбалансов ротора, неуравновешенность ротора, балансировка, ножевые, шарикоподшипниковые, разновращающиеся, вибрирующие опоры.

**Keywords:** static balancing, imbalance, methods of static balancing, resultant vector and moment of rotor unbalances, rotor unbalance, balancing, blade bearings, ball bearing assemblies, differently rotating and vibratory bearings.

**Неуравновешенность подвижной части (ПЧ) прибора или ротора относительно оси вращения — следствие неточности изготовления деталей.** Термины в области балансировки вращающихся тел регламентированы ГОСТ 19534—74; классы точности балансировки для жестких роторов, требования к балансировке и методы расчета дисбалансов — ГОСТ ИСО 1940-1—2007.

Неуравновешенность ротора — состояние, характеризующееся таким распределением масс, которое во время вращения вызывает переменные нагрузки на опорах ротора и его изгиб.

Статическая неуравновешенность ротора — неуравновешенность, при которой ось ротора (ОР) и его главная центральная ось инерции (ГЦОИР) параллельны и смешены на величину  $e_{ct}$  (рис. 1).

Статическая неуравновешенность оценивается величиной главного вектора дисбалансов.

Дисбаланс — векторная величина, равная произведению неуравновешенной массы  $m_i$  на ее эксцентриситет  $\bar{e}_i$  ( $\bar{D}_{cti} = m_i \bar{e}_i$ ).

Главный вектор дисбалансов ротора — вектор, перпендикулярный к оси ротора, проходящий через его центр масс (ЦМ), равный произведению массы ротора  $m_0$  на ее эксцентриситет  $\bar{e}_{cti}$  ( $\bar{D}_{cti} = m_0 \bar{e}_{cti}$ ).

Главный момент дисбалансов ротора  $\bar{M}_D$ , равен геометрической сумме моментов всех дисбалансов ротора относительно его ЦМ и пер-

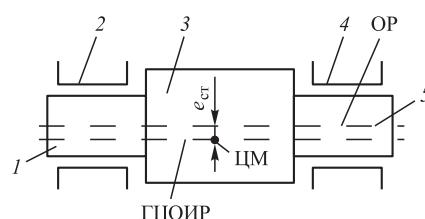


Рис. 1. Статическая неуравновешенность ротора:  
1 и 5 — цапфы; 2 и 4 — опоры; 3 — ротор



пендикулярен ГЦОИР и ОР и вращается вместе с ним:

$$\bar{M}_D = \frac{\bar{M}_0}{\omega^2},$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора;

$\bar{M}_0$  — момент, равный сумме моментов всех неуравновешенных сил  $\bar{F}_i$ ,  $\bar{M}_0 = \sum \bar{M}_i = \sum [l_i \bar{F}_i] = \sum m_i [l_i \bar{r}_i] \omega^2$ ;

$l_i$  — расстояние от силы  $F_i$  до точки, относительно которой определяется момент;

$r_i$  — радиус-вектор от центра неуравновешенной массы  $m_i$  в плоскости коррекции до оси вращения ротора.

Статической балансировке подвергают не врачающиеся или медленно вращающиеся ПЧ, а также относительно быстро вращающиеся детали типа дисков, у которых диаметр  $D$  значительно больше толщины  $B$  ( $D : B \geq 10$ ).

Статическую балансировку проводят либо за счет подрезания свинцовых грузов, либо за счет радиальных перемещений резьбовых деталей, либо за счет пластических деформаций специальных грузиков.

### Методы статической балансировки

**1. На ножевых опорах.** Подвижная часть 2 устанавливается на ножевые опоры 1 и 3 (рис. 2). Дисбаланс

$$\bar{D}_{ct} = m_0 \bar{e}_{ct}.$$

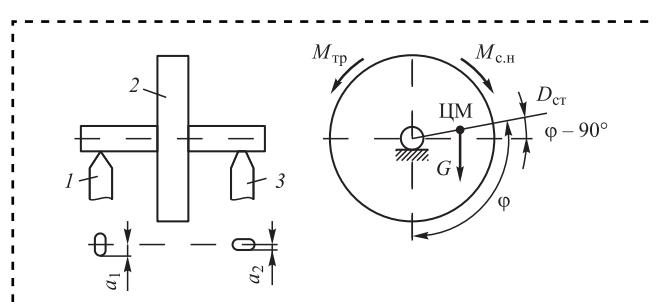
Сила тяжести

$$G = m_0 g,$$

где  $m_0$  — масса ПЧ;

$\bar{e}_{ct}$  — эксцентриситет массы  $m_0$ .

Сила тяжести  $G$  вызывает появление момента статической неуравновешенности  $\bar{M}_{ct} = G \bar{e}_{ct} \sin \varphi$ ,



**Рис. 2. Статическая балансировка на ножевых опорах:**  
1 и 3 — ножевые опоры; 2 — балансируемый ротор (ПЧ)

стремящегося повернуть ПЧ так, чтобы ЦМ оказался в вертикальной осевой плоскости ниже ОР, когда угол дисбаланса  $\varphi = 0$ , т.е. ПЧ проявляет маятниковость. Удаление или добавление корректирующей массы проводят по линии дисбаланса  $\bar{D}_{ct}$ . Статически уравновешенная ПЧ сохраняет состояние безразличного равновесия (не проявляет маятниковой) при любом угловом положении относительно оси вращения ротора.

Точность статической балансировки на ножах зависит от момента трения покоя

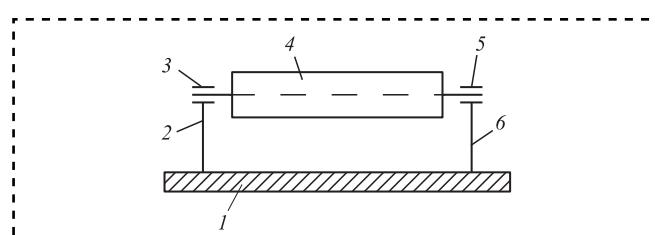
$$\Delta M = M_{tp,pl} + M_{tp,p2}.$$

Чем  $\Delta M$  меньше, тем с большей точностью может быть проведена балансировка. Момент трения на ножевых опорах зависит от конструкции опор. При остром ноже контактная поверхность цапфы и ножа из-за деформации смятия имеет длину  $2a_1$  в направлении качения цапфы. В опорах с ленточными ножами контактная поверхность ленты специально прирабатывается, ее ширина  $2a_2$  в направлении качения цапф будет меньше ( $a_2 < a_1$ ).

При одинаковой площади контакта трение в опорах с ленточными ножами меньше, чем в опорах с острыми ножами, что позволяет выявить меньшую величину дисбаланса и, следовательно, точнее осуществить балансировку ПЧ. Но это только в том случае, если станок изготовлен точно, а рабочие поверхности ленточных ножей расположены горизонтально и на одной высоте, а цапфы ПЧ соосны. Все это обеспечить трудно, и поэтому обычно применяют ножи, имеющие закругления с радиусом  $R = 0,2 \dots 0,5$  мм.

В рассматриваемых далее методах статической балансировки роторов определение их статической неуравновешенности проводят по той же методике, что и при статической балансировке на ножах.

**2. В шарикоподшипниковых опорах.** В таких опорах балансируется большинство узлов гиро-приборов (ГП) (рис. 3).



**Рис. 3. Установка с ШП опорами для статической балансировки роторов:**  
1 — основание; 2 и 6 — стойки; 3 и 5 — ШП опоры;  
4 — балансируемый ротор



Точность балансировки в этом случае определена суммой моментов трения покоя двух подшипников

$$\Delta M_{ct} = M'_{tr.p} + M''_{tr.p}.$$

Задача повышения точности статической балансировки сводится к уменьшению момента трения в опорах.

### Методы повышения точности статической балансировки

Наибольшее применение в машиностроении получили: станки с малогабаритными вибраторами; с разновращающимися шарикоподшипниками (ШП), станки, использующие эффект Жуковского.

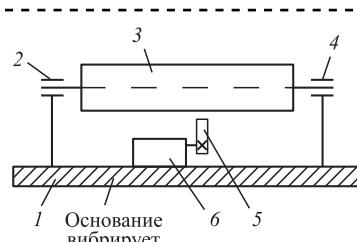
1. Наиболее простой способ повышения точности статической балансировки — станок с ШП опорами (рис. 4), на основании 1 которого устанавливают электродвигатель 6 с эксцентричной массой 5 на валу, тогда точность балансировки определяют суммой моментов трения движения в первой и второй опорах:

$$\Delta M_{ct} = M'_{tr.d} + M''_{tr.d}.$$

Применение малогабаритных вибраторов заменяет трение покоя в опорах на меньшее по величине трение движения, что позволяет повысить точность балансировки.

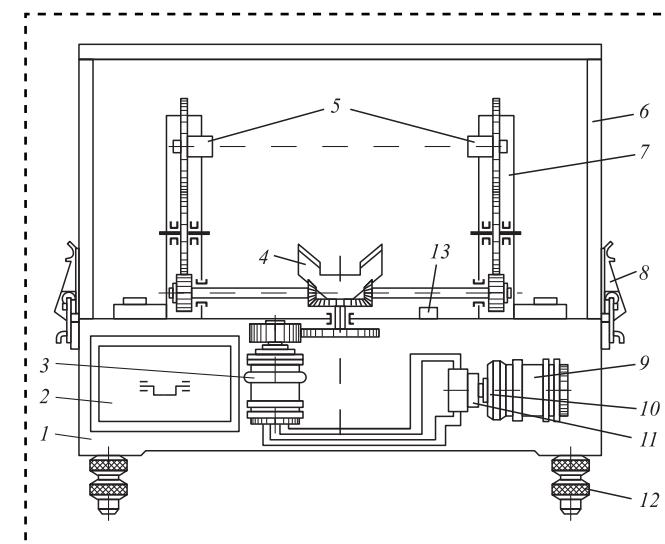
2. Существенное снижение трения достигают применением разновращающихся технологических опор. В этом случае точность балансировки определяется разницей моментов трения движения в двух опорах:

$$\Delta M_{ct} = M'_{tr.d} - M''_{tr.d}.$$



**Рис. 4. Станок с ШП опорами и малогабаритным вибратором для статической балансировки роторов:**

1 — основание; 2 и 4 — ШП опоры; 3 — ротор; 5 — эксцентрическая масса; 6 — электродвигатель



**Рис. 5. Станок для статической балансировки на разновращающихся подшипниках:**

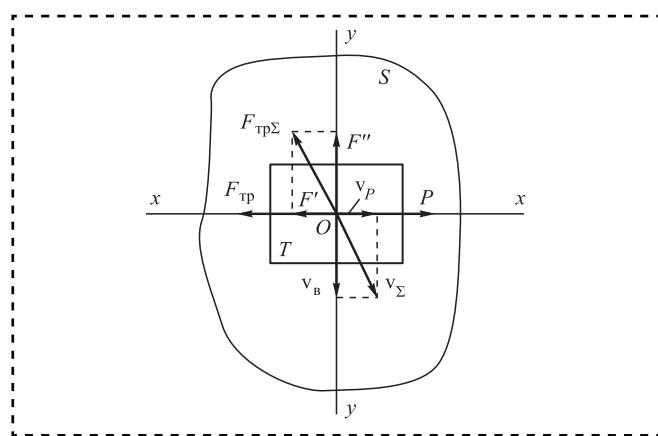
1 — основание; 2 — выдвижной ящик (тара); 3, 9 — электродвигатели; 4 — опоры для поддержания ПЧ при ее монтаже в опорах пинолей; 5 — пиноли; 6 — кожух; 7 — стойка; 8 — замок; 10 — кулачок; 11 — микровыключатель; 12 — регулируемая опора; 13 — уровень

Наружные кольца технологических (или собственных) опор (рис. 5) уравновешиваемой ПЧ закрепляют в пинолях 5. От электродвигателя 3 через зубчатые передачи пиноли приводят во вращение в противоположных направлениях, направление их вращения периодически изменяют переключением фаз питания двигателя 3 посредством микровыключателя 11, электродвигателя 9 и кулачка 10. Выдвижной ящик 2 служит для хранения сменных пинолей.

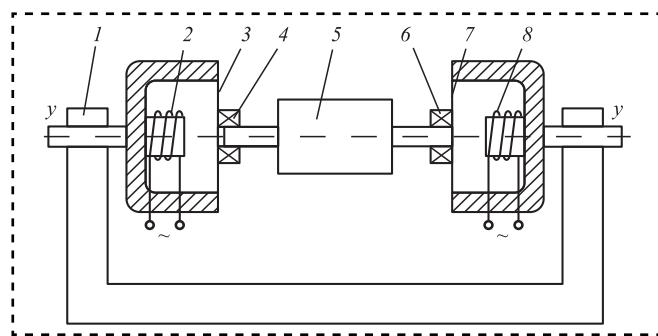
3. В приспособлениях, использующих эффект Жуковского, вдоль осей опор создаются вибрации, мгновенные направления которых противоположны (рис. 6).

Эффект Жуковского сводится к тому, что действие силы трения  $F_{tr}$  можно преодолеть силой  $P$ , которая меньше  $F_{tr}$ . Для этого необходимо опоре  $S$  сообщить вибрации в направлении  $uu$  перпендикулярно  $F_{tr}$  от источника внешней энергии, и тогда против силы  $P$  будет действовать сила  $F'$ , которая меньше  $P$ .

Схема приспособления показана на рис. 7. Ротор 5, подлежащий балансировке, устанавливают через ШП 4 и 6 на упругие пружины 3 и 7. Наружным кольцам ШП с помощью соленоидов 2 и 8 сообщается возвратно-поступатель-



**Рис. 6. Схема появления эффекта Жуковского:**  
T — вращающееся тело; S — плоскость опоры;  $v_p$  — скорость перемещения тела T под действием силы  $P$ ;  $v_b$  — скорость возвратно-поступательного перемещения опоры S;  $v_\Sigma$  — суммарная скорость тела;  $F_{tp}$  — сила трения, препятствующая повороту тела T под действием силы  $P$ ;  $F_{tp\Sigma}$  — сила трения, препятствующая движению тела со скоростью  $v_\Sigma$ ;  $F'$  и  $F''$  — составляющие силы трения



**Рис. 7. Приспособление, в котором используется эффект Жуковского:**  
1 — основание со стойками; 2 и 8 — соленоиды; 3 и 7 — пружины; 4 и 6 — ШП; 5 — ротор

ное перемещение вдоль оси  $uu$ , благодаря чему момент трения относительно этой оси резко уменьшается.

Статическая балансировка проводится либо за счет подрезания свинцовых грузов, либо за счет радиального перемещения резьбовых деталей, либо за счет пластических деформаций специальных грузиков.

### Библиографический список

1. Абрамов И.В., Осетров В.Г., Пичулин И.К., Ярхов Ю.Б. Технология сборочного производства в машиностроении: учеб. пособие / под общ. ред. И.В. Абрамова, В.Г. Осетрова. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2002. 460 с.
2. Ковалев М.П., Моржаков С.П., Терехова К.С. Динамическое и статическое уравновешивание гироскопических устройств. М.: Машиностроение, 1979. 252 с.
3. Осетров В.Г., Слащев Е.С. Сборка в машиностроении. Теория, технология и организация. Ижевск: Изд-во Ижевского ин-та комплексного приборостроения, 2015. 328 с.
4. Тамаркин М.А., Давыдова И.В., Тищенко Э.Э. Технология сборочного производства. М.: Феникс, 2007. 270 с.
5. Уразаев З.Ф., Асс Б.А., Алексеев Я.Н., Мясников Б.Я. Сборка, регулировка и испытание авиационных приборов. М.: Машиностроение, 1983. 288 с.

# СБОРКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛЕЕВ

УДК 621.792

**А.В. Игнатов, канд. техн. наук, М.Э. Винокурова**  
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)  
E-mail: avlig@yandex.ru

## Инновационный метод сборки регулируемых цилиндрических клеевых соединений

К современным методам сборки клеевых соединений предъявляют ряд технологических требований, существенно влияющих на качество получаемой продукции и себестоимость ее изготовления. Предложен новый метод сборки цилиндрических соединений с помощью адгезивов, повышающий качество сборки, позволяющий регулировать взаимное положение собираемых деталей, снижающий себестоимость продукции.

*Determined that modern methods of adhesive joining include a number of technological requirements which have an essentially influence on production quality and its cost of manufacture. It's offered a new joining method of cylindrical parts with adhesives which allow increase joining quality, adjusting joining parts in a relative position, reduce the cost price of production.*

**Ключевые слова:** технологический процесс сборки, регулируемые цилиндрические соединения, клеевые композиции, качество сборки, клеевые соединения.

**Keywords:** technological process of joining, adjusting cylindrical joints, adhesive compositions, joining quality, adhesive joints.

На современном этапе развития машиностроения клеевые композиции активно применяют для получения цилиндрических соединений, заменяя классические способы сборки: сварку, пайку и клепку.

Преимущества клеевых соединений: равномерность распределения напряжений в соединении; способность гасить вибрации и шум; возможность уменьшения размеров, массы, габаритных размеров соединения, объема механической обработки за счет упразднения дополнительных операций; возможность соединения разнородных материалов и материалов, чувствительных к нагреву; предотвращение возникновения электрической и фреттинг коррозии за счет исключения контакта металлов друг с другом; исключение искажения формы тонкостенных соединений; процесс сборки клеевых соединений легко поддается механизации и автоматизации.

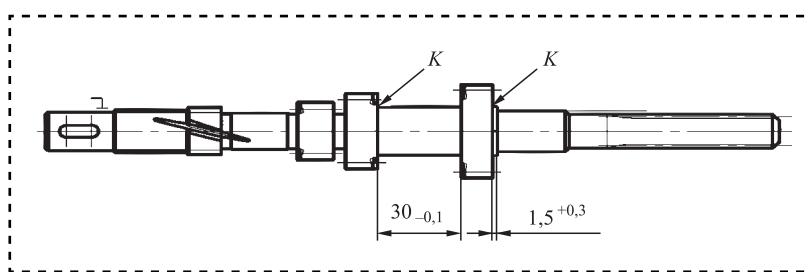
Однако такие соединения чувствительны к термическим и динамическим ударам, их прочность снижается при нагревании. Клеевые

соединения имеют относительно низкую прочность на отрыв, поэтому перед склейиванием необходимо проводить тщательную подготовку поверхности.

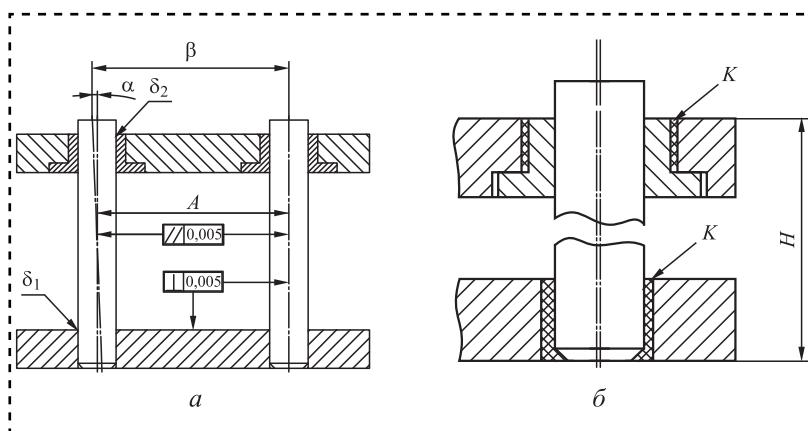
В области машиностроения исследуемый вид соединения используют при установке подшипников в корпуса или на валы, фиксации роторов, шестерен, звездочек и шкивов на валах, установке цилиндрических втулок и гильз в корпуса, и т.д. (рис. 1).

Наибольшую сложность при сборке цилиндрических соединений представляют сдвоенные направляющие, к которым предъявляют повышенные технические требования по взаимному расположению (рис. 2, а). Например, при сборке допускаются углы перекоса между колонками  $\beta = 1^{\circ}37'$ , отклонение колонки от нормали  $\alpha = 48'$ .

В случае нагруженных соединений в данных конструкциях направляющие, как правило, запрессовывают в нижнюю плиту, а с верхней плитой соединяют по посадке с зазором через



**Рис. 1. Сборка соединений, передающих момент:**  
K — kleевая анаэробная композиция



**Рис. 2. Сборка цилиндрических направляющих:**  
a — при запрессовке; б — при склеивании

подшипники скольжения, которые запрессованы в верхнюю плиту. При этом требование свободного перемещения верхней плиты по направляющим без рывков и заеданий обеспечивают только технологическими методами (обработка поверхностного слоя до высокого класса допуска), а взаимные перекосы, отклонения от перпендикулярности приводят к браку в изделии. Такие требования увеличивают трудоемкость и себестоимость изготовления и сборку данных изделий.

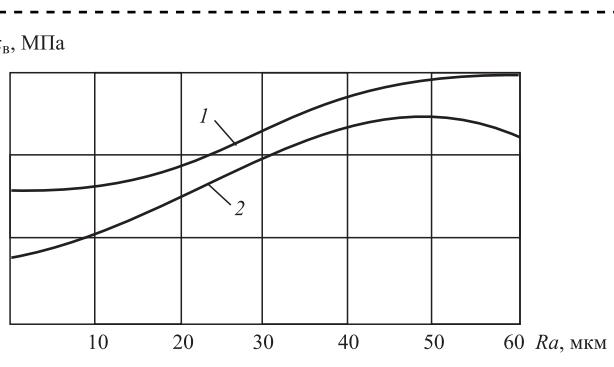
Для малонагруженных изделий вместо прессовых возможно использование kleевых соединений. При таком технологическом методе сборки цилиндрических соединений проводят обработку отверстий с более грубым классом допуска и большего диаметра в нижней плите под направляющие, а в верхней — под подшипники. В этом случае направляющие устанавливают в нижнюю плиту с зазором, который впоследствии будет заполнен соответствующей kleевой композицией. При установке в верхнюю плиту посадка подшипников с направляющей сохраняется, а сборку подшипников с верхней плитой выполняют аналогично установке направляющей в нижнюю плиту (рис. 2, б). В собранном

изделии эксплуатационные требования обеспечиваются за счет регулирования взаимного положения направляющих в kleевом зазоре. После регулирования направляющие фиксируют в требуемом положении до отверждения kleевой композиции. Такой подход позволяет снизить трудоемкость и себестоимость сборки, не снижая качества соединения.

Для получения качественных kleевых соединений рекомендованы значения параметра шероховатости  $R_a = 1,6 \dots 3,2 \text{ мкм}$ . Такие значения позволяют получить хорошее заполнение зазора kleem, а также исключить появление концентраторов напряжений. Например, компания Loctite проанализировала влияние параметра шероховатости поверхности на прочностные характеристики (рис. 3) [1].

Показано, что на прочность соединения также оказывает существенное влияние зазор. Увеличение зазора при тех же параметрах шероховатости поверхности приводит к уменьшению прочности соединения на 10...15 %; снижению скорости отверждения и

неравномерности kleевого слоя, а значит и неравномерности напряжений. ФГУП "НИИ Полимеров" выявило влияние зазора на прочность получаемого соединения (рис. 4). Так, для каждой kleевой композиции в зависимости от ее вязкости существуют граничные величины зазоров. При превышении верхней границы величины зазоров прочность соединения резко снижается.



**Рис. 3. Зависимость прочности соединения от параметра шероховатости поверхности (на примере анаэробного kleя Loctite 648) при зазорах, мм:**

1 — 0,25; 2 — 0,5

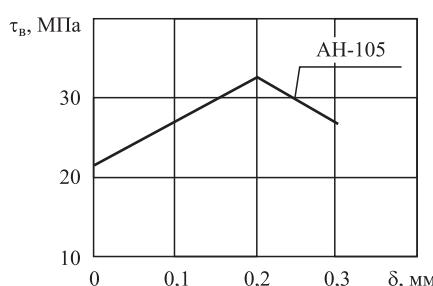


Рис. 4. Зависимость прочности соединения от величины зазора в соединении на примере kleевой композиции AH-105

На вязкость kleевой композиции в значительной степени влияет температура. Ее увеличение приводит к ускорению процесса отверждения и уменьшению вязкости клея, чрезмерное повышение температуры — к деструкции kleевой композиции. Для каждого клея существуют свои граничные интервалы температуры эксплуатации. Выход за пределы этих интервалов приводит к снижению качества соединения [1].

Помимо технологических параметров необходимо рассмотреть технические условия сборки. Сборку рассматриваемого вида соединений проводят с применением специальной и дополнительной оснастки.

Существует несколько методов нанесения kleевых композиций на цилиндрические направляющие:

по спирали, для чего требуется технологическая оснастка, обеспечивающая вращательное и поступательное движения направляющей в отверстие;

внутрь отверстия под давлением, при сборке возможно вытеснение kleевой композиции из kleевого шва;

несколькими локальными витками с последующей установкой направляющей в отверстие, равномерность такого нанесения обеспечивается лишь в процессе сопряжения.

Указанные методы имеют существенные недостатки: перерасход kleевой композиции, вытеснение ее из зоны сборки, что приводит к ухудшению внешнего вида соединения, неравномерности нанесения и наличию пузырьков воздуха в kleевом шве.

При механизации и автоматизации работы используют дополнительные механизмы, позволяющие повысить качество и уменьшить время сборки. Например, устройства нагрева для изменения вязкости клея и увеличения скорости отверждения, задания дополнительного движения перемещения сопла, подающего kleевую композицию.

Рассмотренные особенности приводят к увеличению трудоемкости и себестоимости изготовления выпускаемой продукции.

В рамках исследования по повышению качества сборки цилиндрических направляющих в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан оригинальный метод сборки цилиндрических соединений в вертикальном положении (рис. 5).

Для такого метода сборки необходима технологическая оснастка, которая позволяет регулировать и фиксировать соединения в требуемом положении. При выборе режимов сборки учитывают создаваемый в соединении зазор, взаимное положение деталей, например, угол наклона, асимметричность их положения.

Отличительная особенность метода — подача в зону сборки потока воздушной среды с регулируемым давлением и температурой. Такой прием позволяет предотвратить вытекание клея из зазора, обеспечить равномерность заполнения зазора в соединении, варьировать скоростью отверждения kleевой композиции. Предлагаемый метод не имеет ограничений по существующим kleевым композициям и позволяет использовать клеи различной вязкости.

Подача клея в зону сборки предусматривает его нагнетание с избыточным давлением. В случае разнотолщинности зазора варьируют температурой и давлением воздушного потока по секторам, что создаст благоприятные условия для одновременного отверждения клея во всем kleевом шве.

Для повышения технико-экономических показателей в новом методе использованы дозирующие устройства.

Представленные особенности способствуют снижению трудоемкости и себестоимости из-

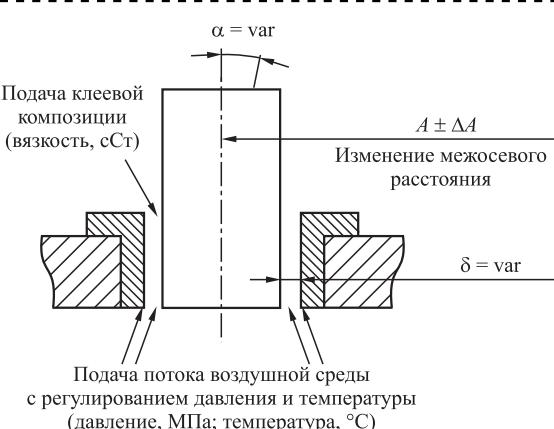
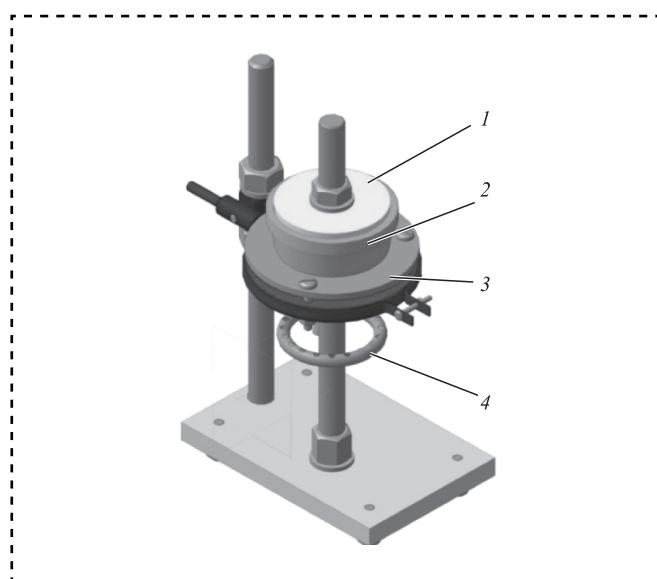


Рис. 5. Сборка регулируемых цилиндрических kleевых соединений



**Рис. 6. Модель экспериментальной установки для подбора оптимальных режимов сборки регулируемых цилиндрических kleевых соединений:**

1 — вал; 2 — втулка; 3 — регулирующая оправка; 4 — насадка с распределителем

готовления продукции, повышению качества сборки цилиндрических kleевых соединений в машиностроении.

Для исследования нового метода сборки, а также подбора оптимальных режимов сборки регулируемых цилиндрических kleевых соединений разработана, спроектирована и изготовлена экспериментальная установка (рис. 6). Втулка 2 из прозрачного стекла позволяет анализировать заполнение зазора kleевой композицией. Перемещением конусного вала 1 вдоль оси втулки 2 регулируют зазор в соединении. В регулирующую оправку 3 устанавливают вкладыши для исследований образцов разного типо-размера. За счет регулировочных винтов в оправке меняют угол наклона собираемых деталей и задают асимметричность их положения. Насадка 4 имеет в своей конструкции распределитель, что позволяет подавать давление равномерно по всему объему kleевого зазора или перераспределять давление по секторам в случае значительной разнотолщины. В основании насадки установлен клапан регулировки давления воздушной среды.

Данная экспериментальная установка дает возможность проводить исследования при различных величинах задаваемого зазора с kleевыми композициями различной вязкости.

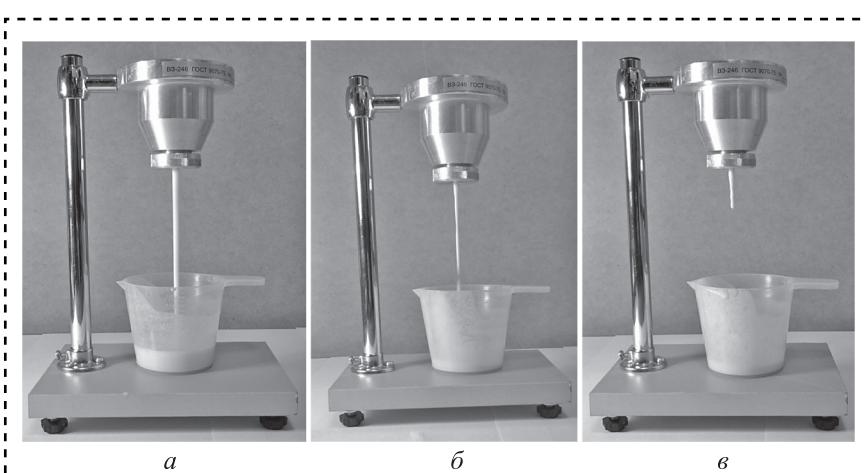
Анализ современных kleевых композиций, применяемых для сборки цилиндрических соединений в машиностроении, показал, что наибольшее распространение получили анаэробные и эпоксидные kleевые составы. В качестве исследуемых материалов выбраны kleевые композиции различных производителей (Loctite, Pergabond и "НИИ Полимеров"). Изучив эксплуатационные и физико-механические параметры изделий с применением kleевых соединений в машиностроении, выявили, что граничные зазоры, используемые для сборки цилиндрических соединений, лежат в пределах от 0,03 до 0,5 мм.

Определение оптимальных режимов сборки, обеспечивающих требуемое качество получаемых соединений и исключающих перерасход kleевой композиции, проводили с использованием имитационного материала. Имитационный материал создан на основе органического клейстера, который позволяет исключить возможность быстрого отверждения.

Kleевые композиции, исходя из литературных рекомендаций и градаций заводов-производителей, объединены в три группы в зависимости от показателя вязкости: композиции низкой (2...1000 сСт), средней (1000...2000 сСт) и высокой вязкости (2000...5000 сСт) (таблица).

Однако для проведения экспериментального исследования и получения более точных характеристик появилась необходимость разработки более жесткой классификации. Таким образом, применяемые в машиностроении kleи были разбиты на 8 подгрупп, в соответствии с которыми подбирался имитационный материал.

С помощью аттестационного тарированного прибора "Вискозиметр ВЗ-246" в соответствии с указанными группами определена рецептура имитационного материала (рис. 7).



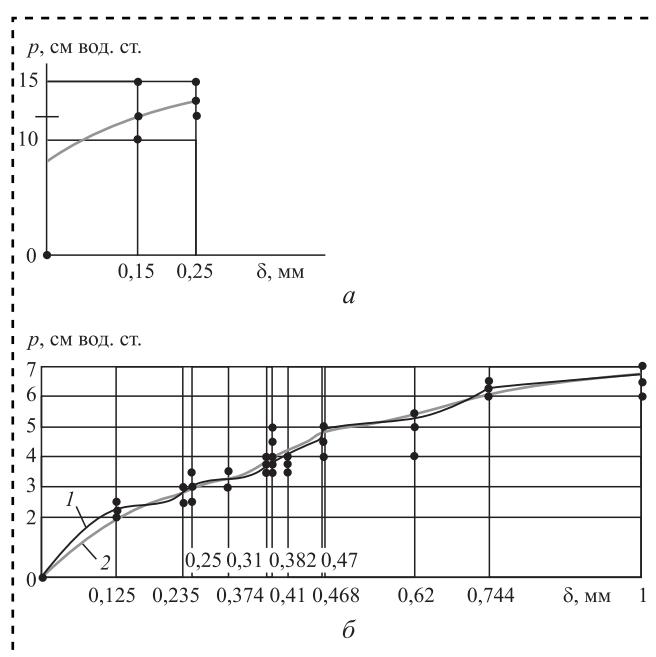
**Рис. 7. Истечение имитационного материала различной вязкости:**

а — низкой; б — средней; в — высокой



## Классификация клеевых композиций по показателю вязкости

Производитель	Группы				Высокой вязкости 3
	Низкой вязкости 1		Средней вязкости 2		
Подгруппы, сСт					
	1 (2...20)	2 (20...300)	3 (300...1000)	4 (1000...1200)	5 (1200...1500)
НИИ Полимеров им. Каргина	KM-200, TK-300	Унигерм 7, Анатерм 112	TK-301	K-202, TK-301, TK-201, KM-201, KM-203, TK-301, Унигерм 10	TK-301, TK-201, KM-201, KM-203, TK-301, Анатерм 111
Loctite	Loctite 406, 408, 420, 770, 5398 7039, 7044, 7063, 7387, 7800, 7801, 7803	Loctite 245, 302, 401, 424, 435, 438, 460, 495, 496, 534, 572, 574, 577, 601, 603, 620, 638, 668	Loctite 270, 315, 350, 480, 510, 542, 640, 649, 660, 2701, 4203, 4850, 5203, 5205, 8010, 9502	Loctite 222, 403, 415, 542, 641, 648, 660	Loctite 262, 326, 352, 358, 542, 641, 3425
Permabond	A905, A1024	A126, A1062, F200	A011, A025, A113, A118, HM129, HM135	A134, HM162	F202, HM162



**Рис. 8.** Зависимость давления воздушного потока от создаваемого зазора для композиций высокой вязкости, сСт:

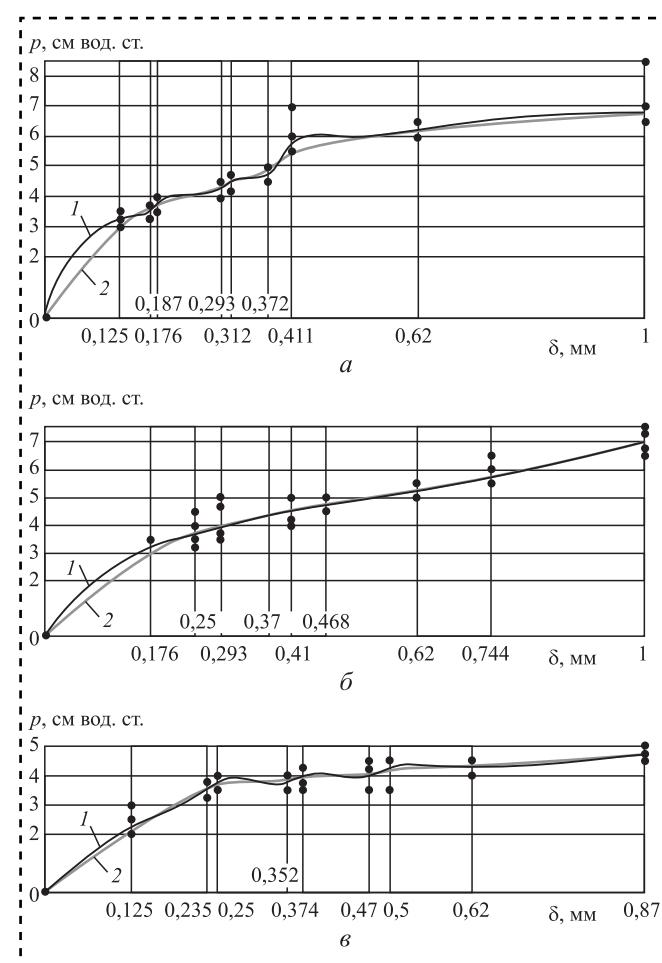
*a* — 2500...5000; *б* — 2000...2500; *I* — экспериментальная зависимость; *2* — аппроксимация зависимости

Экспериментальные исследования с применением имитационного материала по выявлению оптимальных режимов сборки регулируемых цилиндрических kleевых соединений подтвердили действенность рассматриваемого метода. Выявленные режимы сборки обеспечивают удерживание kleевой композиции при различной вязкости в заданном зазоре и способствуют ее равномерному нанесению, исключают вытекание или выпучивание kleевой композиции из соединения, перерасход kleя, сохраняют внешний вид изделия и обеспечивают качество сборки.

Взаимосвязь давления воздушного потока от создаваемого зазора для kleевых композиций группы 3 и подгрупп 7 и 8 соответственно представлена на рис. 8, группы 2 и подгрупп 4, 5 и 6 — на рис. 9, группы 1 и подгрупп 2 и 3 — на рис. 10.

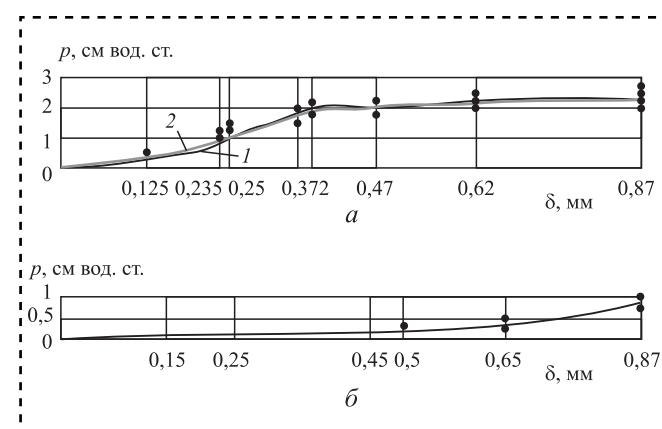
Исключена из рассмотрения подгруппа 1, так как в литературе не встречается сведений о применении kleевых композиций данной вязкости при сборке цилиндрических соединений в машиностроении.

Новый метод сборки цилиндрических kleевых соединений позволяет задавать геометриче-



**Рис. 9.** Зависимость давления воздушного потока от создаваемого зазора для композиций средней вязкости, сСт:

*a* — 1500...2000; *б* — 1200...1500; *в* — 1000...1200; *I* — экспериментальная зависимость; *2* — аппроксимация зависимости



**Рис. 10.** Зависимость давления воздушного потока от создаваемого зазора для композиций низкой вязкости, сСт:

*a* — 300...1000; *б* — 20...300; *I* — экспериментальная зависимость; *2* — аппроксимация зависимости



ские параметры путем регулирования создаваемого зазора (в пределах 0,5...1 мм на сторону), осуществления сборки при асимметричном положении собираемых деталей в пределах 0,5 мм, выполнения сборки при угле наклона собираемых деталей до 5°. Исследования показали возможность сокращения подготовительно-заключительного времени не менее чем на 30 % и уменьшения перерасхода дорогостоящей kleевой композиции не менее чем на 25 %.

Предложенный метод предполагает широкое применение в различных областях машиностроения.

### Библиографический список

1. Barbeau W.H., Cocco J., Cowdrey S. Loctite: справочник. Loctite European Group. 1998. 460 p.
2. Ignatov A.V., Bezmenov V.S. Devices for Transportation and Dosing of Adhesive Compounds at Assembly Facilities // Polymer science. Series D. Vol. 8, No 1. 2015. P. 79—84.
3. Игнатов А.В. Современные достижения в области kleев и герметиков // Клей. Герметики. Технологии. № 11. 2015. С. 35—39.
4. Игнатов А.В. Применение kleев при сборке изделий в машиностроении: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 43 с.
5. Малышева Г.В. Склейивание в машиностроении: справочник. В 2 т. Т. 2. М.: Наука и технологии, 2005. 244 с.
6. Петрова А.П. Клеящие материалы: справочник / под ред. Е.Н. Каблова, С.В. Резниченко. М.: ЗАО "Редакция журнала "Каучук и резина". 2002. 196 с.



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](mailto:realiz@mashin.ru), [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ

УДК 621.6

**В.В. Потапов, канд. техн. наук (Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций (ВНИИАЭС), Москва)**  
E-mail: pv106@yandex.ru

## Герметичность систем безопасности АЭС

*Локализация тяжелых аварий на АЭС связана с организацией ряда барьеров и систем безопасности. Контайнмент реактора — четвертый барьер и пассивная система безопасности (совокупность тепломеханического оборудования, трубопроводов и трубопроводной арматуры). Оборудование, например, насосов компримирует и подает рабочую среду, трубопроводы организуют ее поток, а через арматуру управляют ее потоком. Надежность каждой из систем безопасности контайнмента реактора, как системы, находящейся под давлением среды, во многом определяется герметичностью разъемных соединений ее элементов. Исследовали герметизирующие соединения во взаимосвязи с геометрическими параметрами их уплотнений, определяя подходы к их нормированию.*

*Localization of severe accidents in nuclear power plants is connected with the organization of a number of barriers and security systems. The reactor — the fourth barrier and passive security system (consists of heat-mechanic equipment for power plants, pipelines and valves). Equipment such as pumps, komprimerat and delivers working wednesday, piping organizes its flow through, the valve and control flow. Reliability of each of the containment of the reactor safety systems, as system under pressure wednesday, largely determined by the integrity of demountable joints of its elements. Sealing compounds in conjunction with the geometrical parameters of their seals, determining approaches to rationing researched.*

**Ключевые слова:** атомная станция, контайнмент, системы безопасности, герметичность разъемных соединений, функциональные геометрические параметры материала.

**Keywords:** nuclear power plant, containment, safety systems, integrity of demountable joints, functional geometric parameters material.

При эксплуатации атомных электростанций функционально ответственным и сложным является реакторное отделение с его специальным оборудованием и сооружениями. Для локализации возможных тяжелых аварий с технической точки зрения обеспечение безопасной эксплуатации оборудования и сооружений заключается в том, что на пути распространения радиации во внешнюю среду организуют ряд преград (барьеров) и систем безопасности.

При этом на АЭС продукты деления удерживаются: первым барьером — самой таблеткой ядерного топлива; вторым барьером — циркониевой оболочкой тепловыделяющего элемента (твела); третьим барьером — корпусом реакто-

ра, оборудованием и трубопроводами первого контура и четвертым барьером — сооружением в виде защитной оболочки — контайнмента реактора.

Оболочки контайнмента имеют защитные и локализующие системы безопасности [1], которые представляют собой упорядоченные по функциональному назначению совокупности тепломеханического оборудования, трубопроводов и трубопроводной арматуры. При этом оборудование, например, роторного типа компримирует и подает рабочую среду, трубопроводы организуют ее поток, а через арматуру управляют ее потоком. Надежность каждой из систем безопасности контайнмента реактора, как



системы, находящейся под давлением среды, во многом определяется герметичностью разъемных соединений ее элементов.

Исследования проводили в целях экспериментально-практической оценки герметичности подвижных и неподвижных разъемных герметизирующих соединений (РГС) по утечке через уплотнения: валов оборудования и затворов арматуры, фланцевых и бугельных соединений оборудования, трубопроводов и арматуры, в зависимости от функциональных геометрических параметров (ФГП) и функциональных параметров (ФПМ) уплотнений. При этом нормы на утечки РГС служат основанием для регламентации допусков на ФГП и ФПМ уплотнений при фиксированных значениях ФПМ.

Объекты оценки — промышленные образцы насосного оборудования и клиновых захватов. Испытания промышленных образцов проводили на специальном испытательном оборудовании с использованием оригинальных средств контроля утечек, а также средств контроля ФГП по стандартизованным методикам [3].

### Исследование герметизирующей способности торцевых уплотнений валов насосов

Используют *стенд для обкатки и гидравлических испытаний торцевых уплотнений* различного типа на прочность, плотность и герметичность в статике и динамике (рис. 1 на стр. 3 обложки).

Возможности стенда: быстрая установка и герметизация испытываемых изделий; плавное или ступенчатое увеличение давления контрольной жидкости в испытательной камере и частоты вращения вала шпинделя; вытеснение воздуха из испытательной камеры; оперативное удаление контрольной жидкости из камеры торцевого уплотнения; дистанционное управление давлением контрольной жидкости; контроль температуры масла в камере; блокировка привода вращения шпинделя при отсутствии подачи контрольной жидкости через испытательную камеру и при достижении температуры контрольной жидкости в камере 800 °C.

Конструкция: станина, шпиндельный узел с защитным щитком и камерой для испытываемых изделий, электропривод шпинделя, насосная станция с системой охлаждения, комплект сменной оснастки, пульт управления с системой электронного контроля.

#### Технические характеристики стенда

Испытания в статике:

время испытания, мин . . . . . 10  
давление, МПа . . . . . 8

Испытания в динамике:

время испытания, мин. . . . . 60  
давление, МПа . . . . . 5,5

Рабочая частота вращения

шпиндельного узла, мин<sup>-1</sup> . . . . . 3000

Допускаемая контролируемая

утечка, см<sup>3</sup>/мин . . . . . До 5

Испытательная среда . . . . . Масло турбинное  
Тп-20, 30

Устройство замера . . . . . Электронные весы

Электропитание . . . . . 380 В, 50 Гц

Установленная мощность, кВт:

привод шпинделя . . . . . 22  
гидростанция . . . . . 7,5

Габаритные размеры, мм:

стенда . . . . . 665×1016×1210  
станции гидравлической . . . . . 620×1000×1180  
пульт управления. . . . . 570×705×11202

Масса, кг:

стенда . . . . . 850  
станции гидравлической . . . . . 170  
пульта управления. . . . . 150

Минимальная допустимая утечка торцевых уплотнений валов  $[Q] = 0,015 \text{ см}^3/\text{мин}$  обеспечивается при низких коэффициентах трения в течение длительного времени эксплуатации при исходных отклонениях от плоскостности торцевых поверхностей их колец трения 4...5 мкм (для диаметров колец до 400 мм).

Средняя высота зазора  $h$  в сопряжении вал—кольцо торцевого уплотнения ограничивается  $h_{\max} = 0,2 \text{ мкм}$ . При исключении влияния разности диаметров, эксцентриситета и углового смещения осей вала и торцевого уплотнения (длина зазора относительно DN мала) доля фактических макро- и микронеровностей уплотнительных поверхностей при контакте уменьшается вдвое [3], тогда:

$$h_{\max} = 0,5(\Delta_{\phi 12} + Ra_{12}),$$

где  $\Delta_{\phi 12}$  — суммарная некруглость уплотнений;



## Исследование герметизирующей способности клиновых уплотнений затворов арматуры

Используют *стенды для испытаний задвижек на прочность, плотность и герметичность затвора* (рис. 3 на стр. 3 обложки). Назначение: гидравлические испытания на прочность и плотность материала корпусных деталей; на герметичность затвора; сальниковой набивки и прокладочных соединений; пневматические испытания на герметичность затвора.

Испытательная среда: вода,  $p_{\text{пр.макс}} \leq 37,5$  МПа; воздух,  $p_{\text{макс}} \leq 0,6$  МПа.

Источник давления: пневмоуправляемые насосные станции. Управление и контроль испытаний осуществляются с пульта управления насосной станции.

Энергоносители стенда: сжатый воздух давлением 0,4...0,6 МПа; электросеть 380 В/50 Гц.

Герметизация изделия осуществляется заглушками; заполнение внутренней полости, стравливание воздуха из полости изделия, слив испытательной среды после испытания при помощи навесных запорных органов (в том числе при помощи быстроразъемных соединений). Применение быстроразъемных соединений при проведении испытаний на герметичность затвора с обеих сторон без переустановки арматуры сокращает время испытаний и повышает производительность труда. Расположение приборов контроля непосредственно на стенде обеспечивает точность измерений; все элементы, контактирующие с водой, выполнены из коррозионностойких материалов или имеют покрытия.

Применяемые методы контроля: по объему утечек (при испытаниях на герметичность затвора; приборы контроля — капельница, пузырьковая камера); визуальный (наблюдение места утечки) при испытаниях на прочность и плотность материала корпусных деталей, герметичность сальниковой набивки и прокладочных соединений; манометрический метод (по показаниям контрольных манометров при всех испытаниях).

Точность измерения и протоколирование результатов достигаются при использовании электронного прибора "СЕЙТРОНИК ПГ10-2" или автоматизированной электронной системы "СЕЙТРОНИК СИР-ПГ-300" [5].

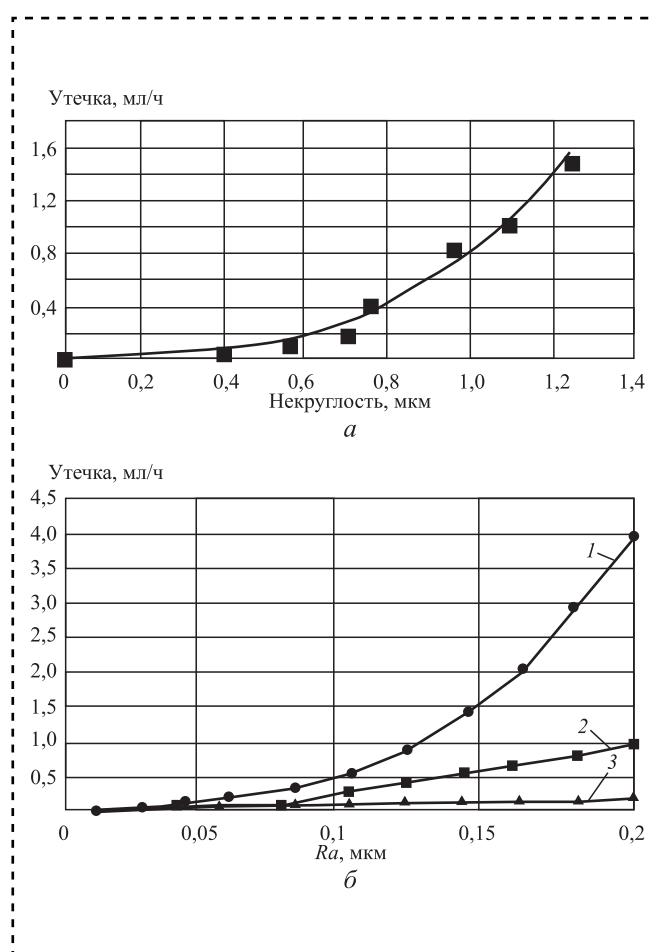


Рис. 2. Влияние суммарной некруглости (а) и шероховатости (б) колец торцевых уплотнений и вала на утечку насоса:

1 — следы обработки совпадают с направлением вращения; 2 — перпендикулярны направлению вращения; 3 — противоположны направлению вращения

$Ra_{12}$  — суммарная шероховатость уплотнений.

Результаты исследования влияния суммарной некруглости и шероховатости уплотнений вала и кольца торцевого уплотнения на утечку (рис. 2) показали соответствие данным фирмы Grundfos [4]:

- утечка существенно зависит от исследуемых ФГП;
- утечка зависит от направлений обработки торцевой поверхности кольца уплотнения (рис. 2, б);
- данные позволяют установить уровни суммарных и отдельных параметров вала и торцевого уплотнения.

По суммарной некруглости допуск сопряжения ограничен 0,25 мкм (рис. 2, а), а по параметру шероховатости — 0,15 мкм (рис. 2, б).

## Характеристики исполнений стенда

ГАКС-И-6-50/600С ГАКС-И-6-100/600С

Максимальная сила зажима, $10^4$ , Н . . . . .	180	300
Диапазон использования по DN, мм . . . . .	50...600	50...600
Расстояние между подвижной и неподвижной траверсами, мм . . . . .	200...1400 (2500)	200...1800
Привод перемещения траверсы . . . . .	Гидравлический	
Герметизация изделия (базовый вариант) . . . . .		Гидропривод
Герметизация изделия для исключения осевого сжатия испытываемых изделий ( <i>по спецзаказу</i> ) . . . . .	Самоуплотняющиеся заглушки	
Расстояние между штангами стенда, мм . . . . .	890	1100
Габаритные размеры, мм . . . . .	3500×2000×1550	4750×1600×1575
Масса (без заглушек), кг . . . . .	3900	5700

Измерение параметров геометрии уплотнений затвора задвижки проводили с использованием специальных приборов [5].

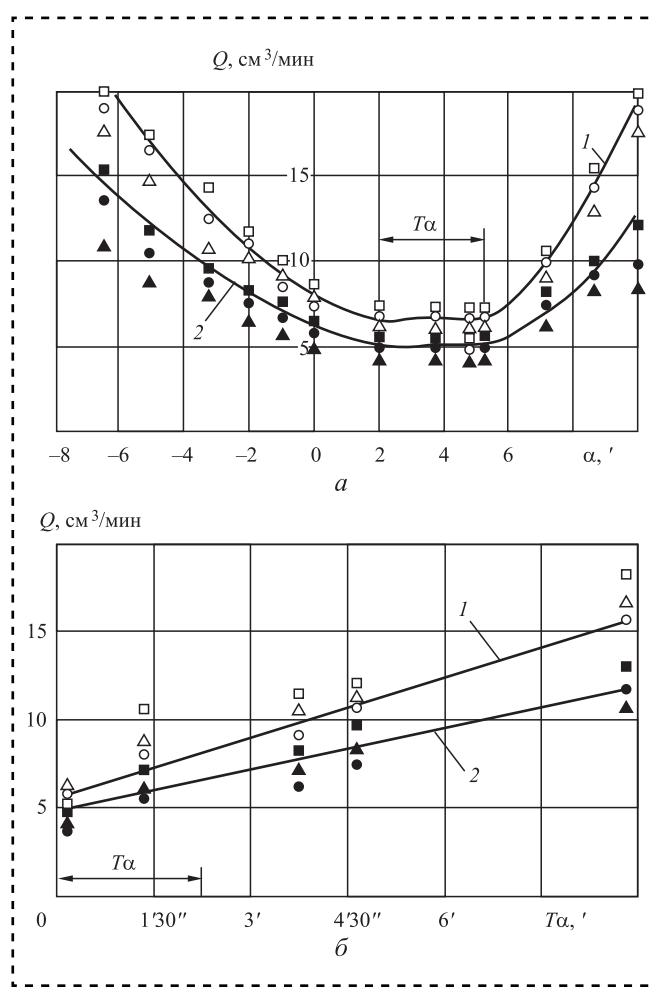


Рис. 4. Влияние погрешности угла в продольном (а) и поперечном (б) сечениях на утечку через клиновой затвор:  
1 —  $p_{cp} = 6,4$  МПа; 2 —  $p_{cp} = 9,0$  МПа

Минимальная допустимая утечка через затвор  $[Q] = 0,018 \text{ см}^3/\text{мин}$  для DN 50 мм по классу АА ГОСТ 9544—2015 должна подтверждаться при испытаниях герметичности клиновой задвижки.

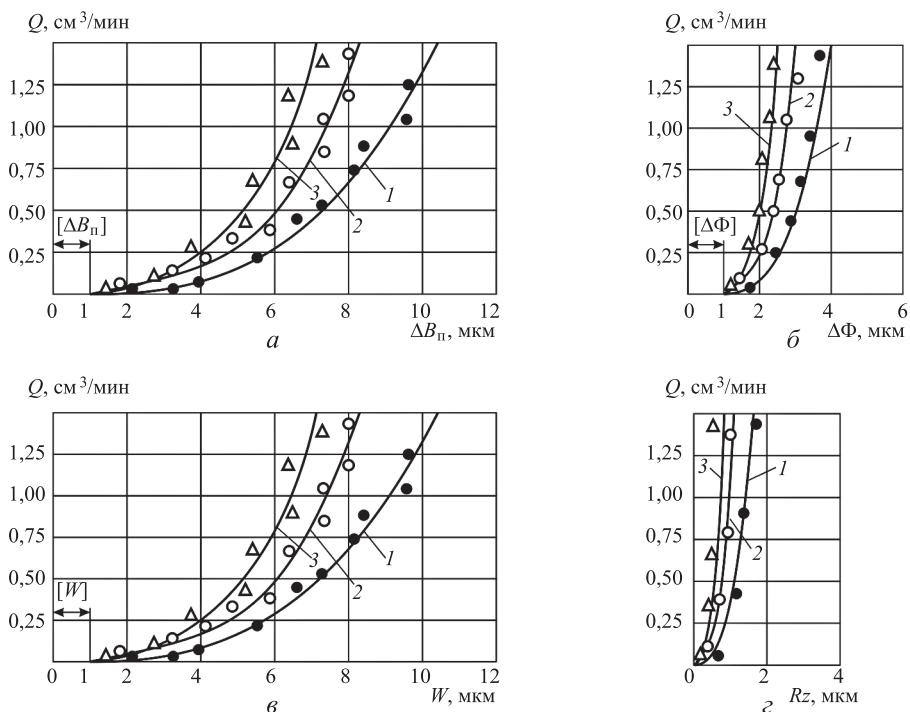
Результаты исследований влияния ФГП уплотнений деталей затвора (клина и седла корпуса) на утечку (рис. 4, 5) при фиксированных значениях ФПМ показали [2]:

- утечка через затвор существенно зависит от исследуемых параметров;
- утечка зависит от отклонений углов уплотнений клина и корпуса. Имеется зона компенсации отклонений —  $2\ldots 5'$ , что является предпосылкой к регламентации данного отклонения размерного параметра (рис. 4, а);
- утечка зависит от погрешности угла клина и корпуса в поперечном сечении (рис. 4, б);
- по влиянию на утечку погрешностей взаимного расположения, формы и волнистости уплотнений клина и корпуса отмечают зоны компенсации — до 1 мкм, которые следует учитывать при регламентации данных уплотнений (рис. 5, а—б);
- утечка зависит от шероховатости уплотнений клина и корпуса, регламентация должна подчиняться классу герметичности затвора (рис. 5, г).

## Результаты исследований

Для ответственных РГС систем безопасности контайнмента реактора, необходимо:

1. Ужесточение ранее рекомендованных значений, регламентация всей номенклатуры ФГП



**Рис. 5. Влияние погрешностей в виде отклонения расположения (а), формы (б), волнистости (в) и шероховатости (г) уплотнений на утечку через клиновой затвор:**  
1 —  $p_{cp} = 0,75$  МПа; 2 —  $p_{cp} = 1,5$  МПа; 3 —  $p_{cp} = 2,25$  МПа

и ФМП торцевых уплотнений валов. Так, некруглость регламентируется 0,6...0,9 мкм, а в соответствии с ГОСТ Р 54805—2011 параметр шероховатости вала ограничивается  $Ra = 0,4$  мкм.

2. В развитие действующего стандарта организации СТ ЦКБА 063—2008 разработать системы допусков на детали затвора клиновых задвижек для систем безопасности (классов герметичности А и АА по ГОСТ 9544—2015).

3. Разработать сводный отраслевой документ по риск-ориентированному подходу к управлению герметичностью систем безопасности контейнента реактора.

#### Библиографический список

1. Потапов В.В. Концептуальные положения и задачи риск-ориентированного подхода к безопасной эксплуатации атомных станций // Компрессорная техника и пневматика. 2017. № 1. С. 44—48.
2. Сейнов С.В. Трубопроводная арматура. Исследования. Производство. Ремонт. М.: Машиностроение, 2002. 392 с.
3. Гошко А.И. Арматура трубопроводная целевого назначения. В 3 кн. М.: Машиностроение, 2003. 992 с.
4. Grundfos Shaft Seal. Grundfos. 2009. Р. 108.
5. Технологии, оборудование, приборы для производства и ремонта трубопроводной арматуры: каталог-справочник НПО "ГАКС-Армсервис" / С.В. Сейнов и др. М.: Прондо, 2015. 83 с.



УДК 621.79.024.2; 621.77.02

**Д.Г. Громаковский, д-р техн. наук (Самарский государственный технический университет),  
А.А. Коптев, Е.В. Крышень (АО "Авиагрегат" холдинга "Технодинамика", г. Самара),  
С.В. Шигин (Самарский государственный технический университет)**  
*E-mail: pnms3@mail.ru*

## Кавитационная установка для мойки внутренних поверхностей трубчатых деталей

*Рассмотрены проблемы использования низкочастотной кавитации в технологии мойки внутренних поверхностей труб из алюминиевого сплава перед нанесением электролитических покрытий.*

*The problems of using low-frequency cavitation technology of washing of internal surfaces of tubes of aluminum alloy prior to application of electrolytic coatings.*

**Ключевые слова:** мойка, низкочастотная кавитация, струйная кавитация, кавитационная моечная установка, ударные волны, вибротурбулизация.

**Keywords:** washing, low frequency cavitation, cavitation jet, the cavitation washing machine, shock wave, vibrator-pleasure.

Очистка поверхностей при нанесении электролитических покрытий — важное технологическое мероприятие, обеспечивающее прочность соединения покрытий с основанием. Опасные для электролитического осаждения покрытий загрязнения: адгезия жирных компонент и шаржированные при шлифовании абразивные частицы, внедрившиеся в обработанную поверхность.

Для очистки поверхностей от адгезионных и шаржированных твердых частиц используют ультразвук [Leighton T.G. The Acoustic bubble. London: Academic, 1997. 633 p. и др.]. Однако при высоких требованиях к прочности покрытий промывка с применением ультразвука не всегда обеспечивает необходимую и достаточную степень очистки поверхностей [Маргулис М.А., Грундель Л.М. Исследование физико-химических процессов, проходящих под действием низкочастотных акустических колебаний // Физика химии. 1982. Т. 56. № 6. и др.]. Наиболее высокие результаты промывки удается получить при использовании кавитации моющей жидкости [1] и др.

Кавитация (от лат. *cavitas* — пустота) — динамический процесс, при котором в жидкости образуются кавитационные пузырьки или каверны в результате локального понижения давления в жидкости за счет увеличения скорости пульсации (гидродинамическая кавитация) либо при

прохождении акустических волн большой интенсивности во время каждого полупериода разрежения (акустическая кавитация) [2]. Перемещаясь с потоком в зону с более высоким давлением во время полупериода сжатия, кавитационный пузырек при встрече с очищаемой поверхностью схлопывается и излучает ударную волну, что и очищает промываемые поверхности (рис. 1).

Как показывает опыт современного производства, кавитационные установки для мойки деталей востребованы во всех сферах машиностроения, эксплуатации и ремонта машин. В НТЦ "Надежность" СамГТУ разработаны два типа моющих машин:

для малогабаритных деталей (рис. 2, а), промываемых при их погружении в кавитирующую жидкость;

для изделий сложной формы и больших габаритов, где кавитация возбуждается в струях моющей жидкости (рис. 2, б).

При применении в качестве моющей жидкости технической воды кавитация оптимальна при температуре 20...25 °C и давлении на уровне насыщенного пара 2,34...3,17 кПа [3].

Впервые эффект кавитационной турбулентности обнаружили Р.А. Тевоян и Н.М. Михайлов и назвали его "вибротурбулизацией", а одна из первых кавитационных установок создана

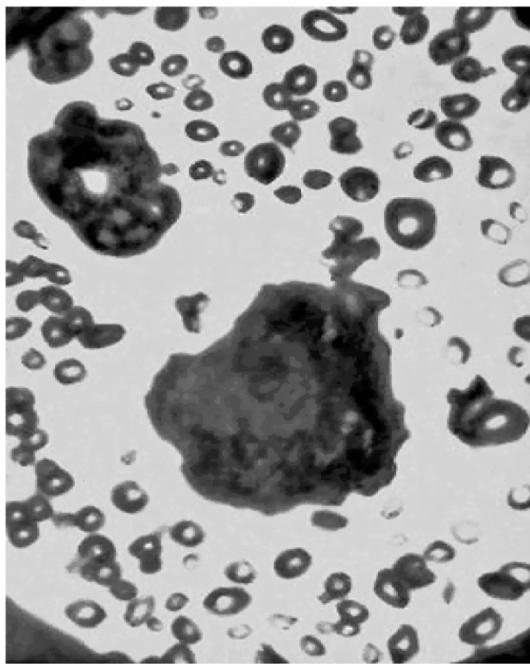


Рис. 1. Кавитационные пузыри на торцевой поверхности вибрирующего стержня,  $\times 2 \cdot 10^3$

в России М.А. Маргулисом и Л.М. Грунделем в 1983 г. (патенты РФ № 1734886 и 2024336).

В нашем случае характеристики кавитации исследовали на установке, показанной на

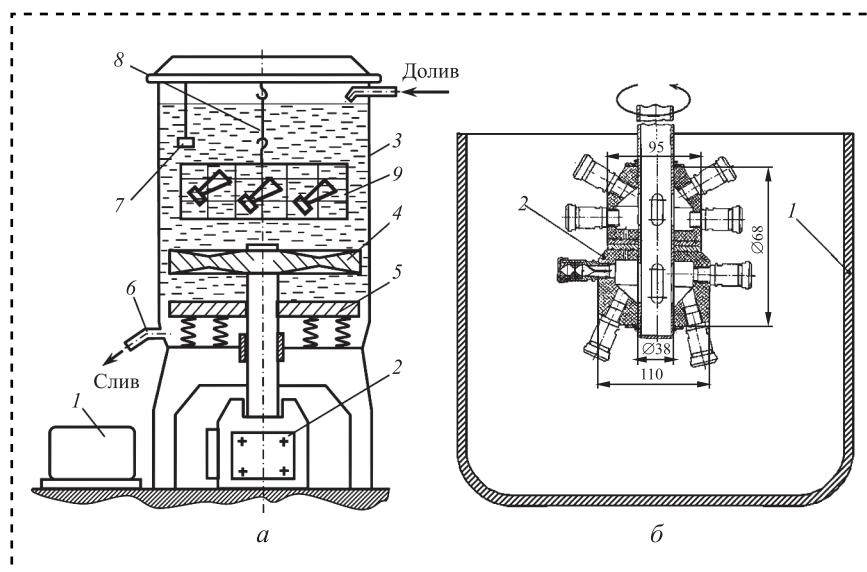


Рис. 2. Примеры кавитационной мойки:

*a* — погружение деталей в моющую жидкость: 1 — электродвигатель; 2 — вибропривод пульсации давления; 3 — кавитационная камера; 4 — активатор; 5 — резонатор; 6 — слив; 7 — датчик пульсации давления; 8 — устройство для погружения и выгрузки деталей; 9 — устройство для размещения промываемых деталей; *б* — струйная мойка баков ракетносителей: 1 — промываемая емкость; 2 — блок струйно-кавитационных форсунок

рис. 2, *a*. В емкости для оценки пульсации давления размещен датчик давления LX-610, сигналы которого обрабатывали на усилителе ИС-1245 и выводили на магнитофон "Тембр-2М".

Оценку амплитудно-частотных характеристик низкочастотной кавитации при мойке деталей проводили в двух частотных поддиапазонах — 10...100 и 500...2000 Гц.

При выборе эффективных параметров кавитации наблюдали основной эффект очистки поверхности, состоящий в интенсивной эрозии загрязнений на поверхности труб под действием разрыва пузырьков, бомбардирующих очищаемую поверхность. Наряду с кавитацией немалую роль в повышении качества мойки играет резонанс при возбуждении продольных волн вдоль оси ванны.

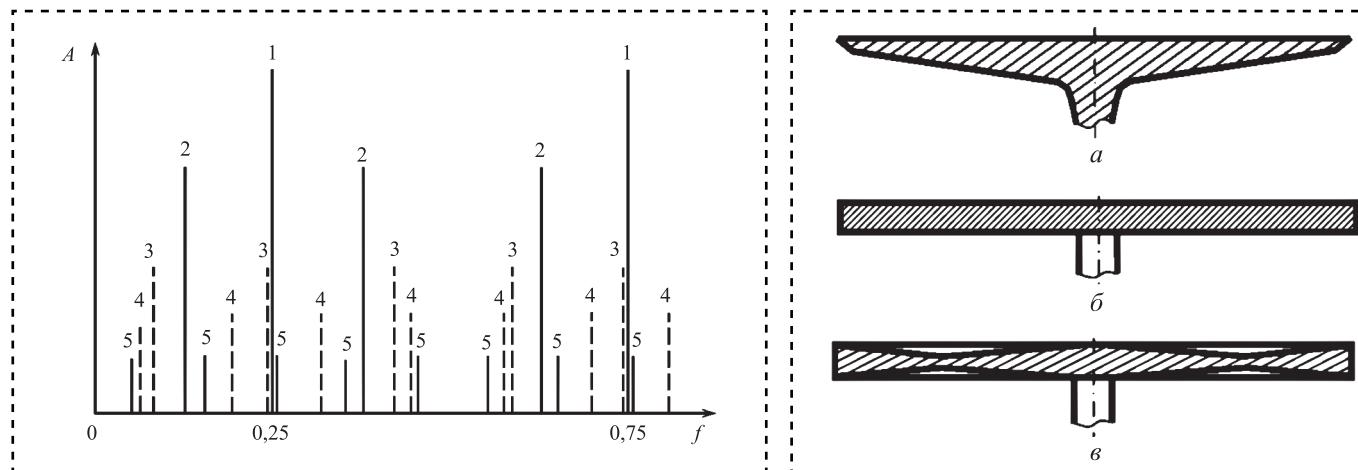
В испытанной установке при диаметре моющей камеры 360 мм и высоте столба моющей жидкости 750 мм в диапазоне частоты 10...200 Гц наблюдали два наиболее интенсивных резонанса: первый на частоте  $f_1 \approx 20$  Гц, второй —  $f_2 \approx 150$  Гц.

Наибольшая эффективность мойки — при резонансе на частоте около 20 Гц и оптимальной амплитуде возбуждения диска-активатора 10 мм. Общая амплитудно-частотная характеристика моечной установки получена при частотной развертке возбуждения (рис. 3). При ее оптимизации оценили эффективность трех типов дисков-активаторов (рис. 4).

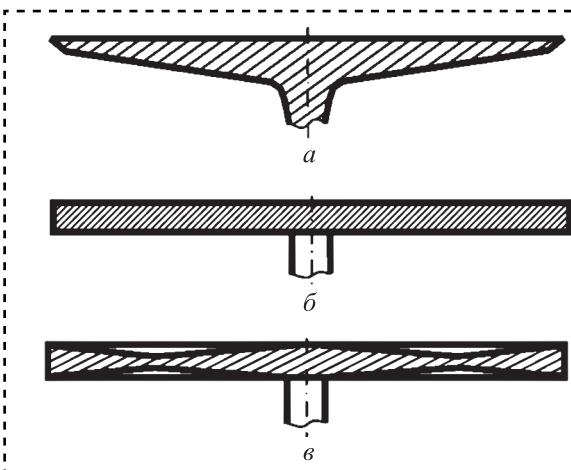
Время промывки — менее 5 мин.

Экспериментально определили оптимальный диаметр диска-активатора —  $D_{\text{диска}} = 0,96D_{\text{ванны}}$  (где  $D_{\text{ванны}}$  — диаметр ванны) при форме диска с переменным профилем.

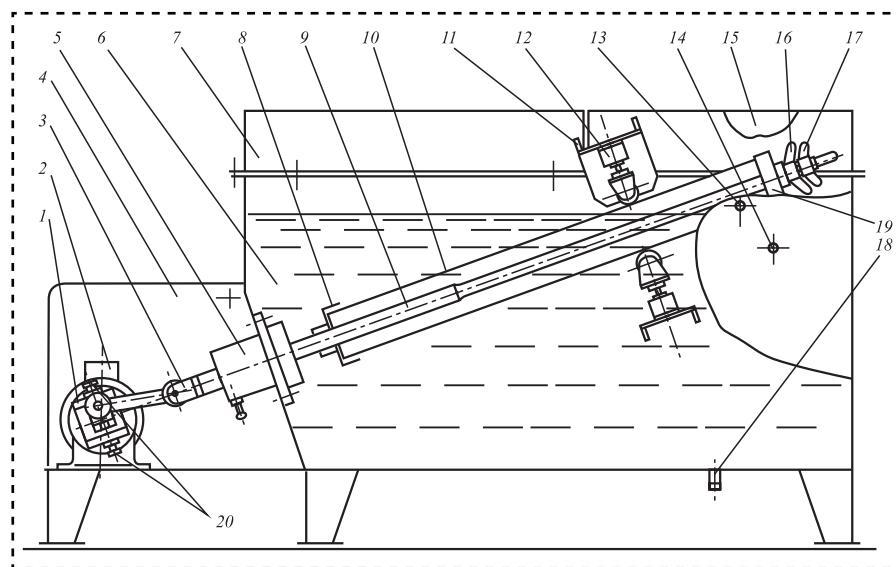
Выполнили разработку рабочего проекта установки (рис. 5). При работе установки промываемую трубу 10 устанавливали в рабочую емкость 6 на шток 9 вибропривода, заполняя ее водой примерно на 75 % объема, закрывали емкость съемным фланцем 19 и фиксировали винтами 16 и 17. Включали кавитационный вибропривод. После завершения промывки трубу устанавливали в накопительную кассету для просушки. К установке подводили техническую воду (давление 0,3...0,5 МПа), пневмо-



**Рис. 3. Общая характеристика резонансов различных порядков, возникающих в реакторе при частотной развертке**



**Рис. 4. Формы исследованных дисков—активаторов:**  
**a** — плоский с наружной стороны; **б** — плоский с обеих сторон; **в** — с переменным профилем



**Рис. 5. Схема установки для кавитационной мойки трубчатых деталей:**

1 — механизм привода; 2 — электродвигатель; 3 — регулируемая вилка; 4 — кожух; 5 — втулка; 6 — емкость; 7 — крышка несъемная; 8 — нижний фланец крепления трубы; 9 — шток; 10 — обрабатываемое изделие; 11 — балка; 12 — роликовая опора; 13 — штуцер заливной; 14 — штуцер контроля уровня залива; 15 — крышка откидная; 16 — гайка-барашек; 17 — стопорный винт; 18 — штуцер сливной; 19 — верхний фланец крепления трубы; 20 — винты с контргайками регулировки амплитуды колебаний штока

сеть (давление 0,3...0,5 МПа), сливную канализацию, вытяжную вентиляцию. Мощность электропривода моечной установки — 2,0 кВт.

Экономический эффект от внедрения установки для кавитационной мойки трубчатых деталей составляет (при существующем объеме производства) порядка 2,18 млн руб. в год при вложении на разработку и изготовление установки около 1,0 млн руб.

Научно-технический центр "Надежность технологических, энергетических и транспортных ма-

шин" СамГТУ заинтересован в расширении сотрудничества и намерен продолжить свою специализацию в области проектирования кавитационных моющих установок и организации их производства.

## Вывод

Представленные проекты кавитационных установок для мойки погружением в моющую жидкость и для струйной мойки, использующие низкочастотную кавитацию, при невысокой стоимости установок обеспечивают высокий уровень качества и производительности промывки, что подтверждено при промывке деталей шасси самолетов в АО "Авиагрегат" холдинга "Технодинамика" и баков ракетносителей в АО "РКЦ "Прогресс" (г. Самара).

## Библиографический список

1. Отчет по договору № АА — 884 / 2014 от 23.01.2015 г. Исследование, разработка технологии и установки для очистки внутренних поверхностей алюминиевых труб. Самара: СамГТУ, 2016. 87 с.
2. Интернет-ресурс. Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/91977/Кавитация>; <https://ru.wikipedia.org/wiki/Кавитация>.
3. Интернет-ресурс. Режим доступа: [http://school-physics.spb.ru/data/labs/Saturated\\_steam.pdf](http://school-physics.spb.ru/data/labs/Saturated_steam.pdf).

# ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

УДК 621.9

**М.Ш. Мигранов, д-р техн. наук, М.С. Дементьев, А.М. Мигранов**  
(Уфимский государственный авиационный технический университет)  
E-mail: migmars@mail.ru

## Исследование износостойкости режущего инструмента при сухом электростатическом охлаждении

Представлены результаты экспериментальных исследований износостойкости режущего инструмента при лезвийной обработке резанием с применением сухого электростатического охлаждения контактной зоны.

*The results of experimental researches of wear resistance of cutting tools with cutting edge machining with the use of dry electrostatic cooling surface area.*

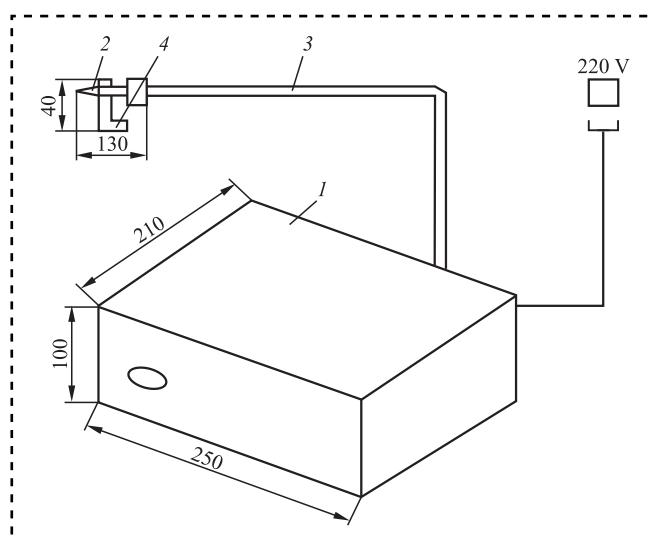
**Ключевые слова:** сухое трение, точение, инструмент, износ, температура резания, СОТС, ионизированный воздух.

**Keywords:** dry friction, turning, tool, wear, cutting temperature, coolants, ionized air.

В промышленно развитых странах (Япония, США, Германия) происходит уверенный отказ от смазывающе-охлаждающих жидкостей (СОЖ) ввиду токсичности и неудовлетворительных санитарно-гигиенических условий на рабочем месте. Также применение СОЖ достаточно неэкономично в сравнении с некоторыми источниками охлаждения. Выбор воздуха в качестве технологической среды (ТС) обусловлен доступностью и дешевизной. Воздух подают к станку по специально налаженной сети или берут из атмосферы и сжимают с помощью компрессора. Эффективность метода заключается в повышенной способности ТС выносить мельчайшие частицы из зоны резания, что обеспечивает наблюдение за состоянием инструмента и поверхностью детали. Метод сухого электростатического охлаждения (СЭО) заключается в том, что в зону резания подается ионизированный воздух, который ионизируется при прохождении между высоковольтным электродом и отверстием сопла. Происходит управление активностью естественной среды (электрическим разрядом) и последующее воздействие активированной

воздушной среды на физико-химические контактные процессы, протекающие на границе раздела между обрабатываемым материалом и режущим инструментом.

Смазывающее действие СЭО проявляется в более интенсивном образовании граничной оксидной пленки, адсорбционно и химически связанной с трущимся поверхностью [1]. Толщина пленки колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен ангстрем. Сопротивление сдвигу такой пленки выше, чем у жидких пленок. Высокая интенсивность образования пленки и процесс пассивации объясняется наличием озона и ионов кислорода. Смачивающее и проникающее действия при СЭО проявляются весьма заметно за счет наличия заряженных частиц и их направленного движения в результате как гидродинамического движения воздуха, так и разности потенциалов. Режущие и пластифицирующее свойства СЭО приводят к образованию размягченного слоя, играющего роль смазочного материала. В основе двух последних свойств лежит так называемый эффект Ребиндера, заключающийся в изменении механических свойств твер-



**Рис. 1. Установка СЭО "Варкаш":**

1 — блок питания; 2 — сопло; 3 — высоковольтный кабель подачи напряжения от блока питания к соплу-ионизатору; 4 — штуцер для подачи сжатого воздуха в сопло-ионизатор

дых тел под влиянием поверхностных физико-химических процессов, приводящих к снижению поверхностной энергии твердого тела и к соответствующему снижению прочности [1]. Одна из специфических особенностей СЭО — сильное электрическое поле и направленное движение униполярно заряженных частиц, вызывающих приток или уход электронов с поверхности металла. При положительной короне приповерхностный слой металла оказывается обогащен электронами, при отрицательной — наоборот. Изменяя режим работы установки СЭО, можно управлять элементным и фазовым составами

поверхностного слоя режущего инструмента [2]. В итоге это ведет к повышению стойкости режущего инструмента.

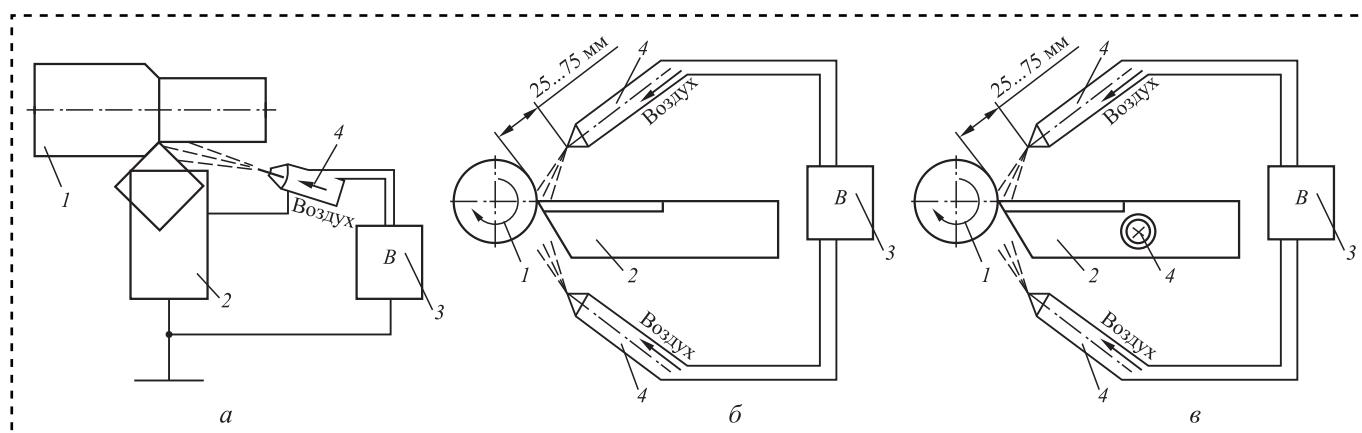
Эксперименты по установлению зависимости интенсивности износа режущего инструмента от способа охлаждения зоны резания и схемы подачи СЭО, определению рациональных режимов обработки резанием и способа охлаждения для последующего практического применения проводили на токарно-винторезном станке 1К62 с измерительной аппаратурой и термоэлектронным преобразователем — термопарой. Охлаждали зону резания традиционными смазочно-охлаждающими технологическими средствами, воздухом и установкой СЭО "Варкаш" (рис. 1). В качестве обрабатываемого материала использовали коррозионно-стойкую хромоникельмолибденовую сталь марки 40ХН2МА и жаропрочный сплав ХН62КМБЮТ. В качестве режущего инструмента — резцы из твердых сплавов марок ВК8 и ВК6.

Режимы резания: глубина  $t = 0,125$  мм, подача  $S = 0,11$  мм/об при постоянной геометрии режущего инструмента:  $\phi = \phi_1 = 45^\circ$ ,  $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$ ,  $R = 0,5$  мм. Критерием затупления резца считали износ по задней поверхности  $h_3 = 0,3$  мм.

#### Схемы экспериментов (рис. 2):

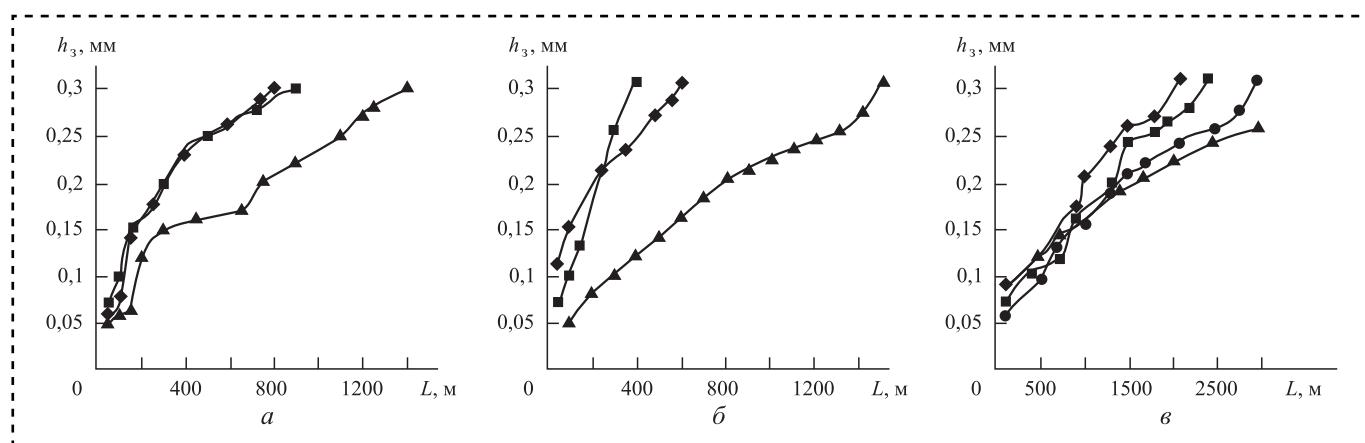
- поток ионизированного воздуха подается с односоплового аппарата непосредственно в зону контакта режущего инструмента с заготовкой (рис. 2, а);

- поток ионизированного воздуха подается с двухсоплового аппарата по передней и задней поверхностям резца (рис. 2, б);



**Рис. 2. Схема подачи среды на поверхность резания:**

а — односопловой аппарат; б — двухсопловой аппарат; в — трехсопловой аппарат; 1 — заготовка; 2 — режущий инструмент; 3 — установка "Варкаш"; 4 — сопловой аппарат с коронирующим электродом



**Рис. 3. Зависимость износа по задней поверхности от пути резания при точении заготовки:**

*a* — 40ХН2МА резцом ВК8; *б* — ЭП742-ИД резцом ВК6; *в* — ХН62КМБУТ резцом ВК8; ■ — сухое резание; ▲ — охлаждение сжатым воздухом; ◆ — СЭО; ● — СОЖ

— поток ионизированного воздуха подается с трехсплового аппарата в трех направлениях по передней, задней и тыльной поверхности резца (рис. 2, *в*).

При проведении температурных и износостойкостных исследований приняли следующую последовательность:

1) измеряли температуру и интенсивность износа инструмента при обработке всухую. Скорости подбирали исходя из возможности выявления минимума относительного износа или максимума длины пути резания до затупления инструмента и определения оптимальной скорости резания  $v_0$ ;

2) в зону резания подавали струю направленного сжатого воздуха под давлением  $p = 1\ldots4$  атм и проводили замер износа инструмента по задней поверхности на различных скоростях резания;

3) в зону резания подавали ионизированный воздух (выходной ток установки 30...70 мА);

4) измеряли износ по задней поверхности и термо-ЭДС каждые 50 м пути резания (по 4—5 замеров на каждой скорости).

Установили зависимость износа по задней поверхности  $h_3$  от пути резания при точении без охлаждения, с охлаждением воздухом, с СОЖ и СЭО (рис. 3). Метод СЭО для стали 40ХН2МА позволяет в 2 раза повысить размерную стойкость инструмента, но  $v_0$  незначительно снижается (с 112 до 96 м/мин), что снижает производительность обработки. Для жаропрочного сплава ХН62КМБУТ, где общий уровень интенсивности износа выше, чем для стали 40ХН2МА, СЭО

позволяет увеличить оптимальную скорость резания, но размерная стойкость при этом снижается.

Износстойкость режущего инструмента определяется периодом его стойкости:

$$T = \frac{l}{S},$$

где  $l$  — путь резания при соответствующем критерии затупления  $h_3^{kp}$  и относительных линейном  $h_{o,l}$  и поверхностным износом  $h_{o,p}$ .

Для каждого режима обработки рассчитывают относительный линейный и поверхностный износ:

$$h_{o,p} = \frac{(h_{3,k} - h_{3,n}) \cdot 100}{(l_k - l_n) S};$$

$$h_{o,l} = \frac{(h_{3,k} - h_{3,n}) \cdot 100}{l_k - l_n},$$

где  $h_{3,k}$  — конечный износ, мм;

$h_{3,n}$  — начальный износ, мм;

$l_k$  — конечная длина пути резания, м;

$l_n$  — начальная длина пути резания, м.

Для обоих материалов оптимальное значение термо-ЭДС (соответствующее скоростям  $v_0$ , при которых  $h_{o,l}$  минимально) не является постоянным, что усложняет оптимизацию режимов резания с СЭО по температурному критерию. Снижение  $v_0$  для стали 40ХН2МА объясняется окислением зоны контакта и уменьшением сил трения, что приводит к уменьшению адгезионной составляющей износа [1, 2, 4, 5]. Для жаропрочного никелевого сплава ХН62КМБУТ эффект окисления, как смазывающий, почти ис-



ключается в диапазоне температур 500...700 °C. Наблюдаемое снижение оптимальных значений термо-ЭДС объясняется тем, что для метода СЭО активные ионы воздуха приводят к росту доли тепла, уходящего в стружку и уменьшению теплонапряженности в режущем инструменте.

### Выводы

Применение метода СЭО режущего инструмента позволяет сохранить его стойкость, а в ряде случаев повысить ее в 2–2,5 раза по сравнению с сухим резанием. Стойкость режущего инструмента увеличивается в сравнении с применением товарных СОЖ эмульсионного типа при обработке коррозионно-стойких сталей, жаропрочных сплавов (коррозионно-стойкой хромоникельмолибденовой стали и жаропрочного никелевого сплава) инструментом из твердых сплавов.

Шероховатость обработанной поверхности не увеличивается с применением метода СЭО, а в ряде случаев даже уменьшается.

При использовании метода СЭО повышается надежность работы режущего инструмента, что имеет исключительно важное значение в механообработке, особенно при эксплуатации станков с ЧПУ гибкого автоматизированного производства.

Эффект от применения метода СЭО, по сравнению с традиционными методами охлаждения режущего инструмента проявляется в довольно широком диапазоне режимов резания. Наибольший эффект от применения метода СЭО достигается на высоких скоростях резания (для твердых сплавов 150...300 м/мин).

СЭО-технология обеспечивает повышение производительности обработки в 1,5–2 раза, уменьшение загрязненности воздуха рабочей зоны.

### Библиографический список

1. Бердичевский Е.Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов: справочник. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
2. Электрофизические процессы в сильных электрических и магнитных полях: межвузовский сб. науч. тр. ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 1987. 148 с.
3. Безъязычный В.Ф., Аверьянов И.Н., Кордюков А.В. Расчет режимов резания: учеб. пособие. Рыбинск: РГАТА, 2009. 185 с.
4. Гордон М.В. Исследование трения и смазок при резании металлов // Трение и смазки при резании металлов. 2002. С. 7–138.
5. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Интенсификация процесса механообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.



УДК 621.893

**П.Н. Хопин,** канд. техн. наук (Московский авиационный институт  
(Национальный исследовательский университет))  
E-mail: chopinp@mail.ru

## Исследование периода приработки пар трения с твердосмазочными покрытиями в нормальных атмосферных условиях

Получена комплексная модель второго порядка для расчета продолжительности приработки пар трения скольжения с ТСП ВНИИ НП 212 в нормальных атмосферных условиях для скорости скольжения  $v = 0,26\ldots1,06 \text{ м/с}$ , контактного давления  $p = 44,4\ldots101 \text{ МПа}$ . Выявлена корреляционная зависимость продолжительности приработки от температуры трения. В целях повышения точности определения времени окончания приработки пары трения скольжения разработан способ, основанный на свойстве повышенной окислительной способности неприработанной поверхности пары трения скольжения и не зависящий от разброса экспериментальных результатов по коэффициенту трения на установившемся режиме.

The complex model of the second orders for calculation of duration extra earnings of couples of sliding friction with SLC VNII NP 212 for conditions of the normal atmospheric conditions for speed of sliding of  $v = 0,26\ldots1,06 \text{ m/s}$ , contact pressure  $p = 44,4\ldots101 \text{ MPa}$  is received. Correlation dependence of duration extra earnings from friction temperature is revealed. For the purpose of increase of accuracy of definition of time of the termination extra earnings of couple of sliding friction the way based on property of the increased oxidizing ability of not earned extra surface of couple of sliding friction and which isn't depending on dispersion of experimental results on friction coefficient on the set mode is developed.

**Ключевые слова:** приработка, твердосмазочные покрытия.

**Keywords:** extra earnings, solid lubricating coating.

**Начальная стадия изнашивания** деталей машин и механизмов сопровождается процессом приработки, при котором изменяются геометрия поверхностей трения и физико-химические свойства материалов [1].

Для узлов трения, автономно функционирующих как в нормальных атмосферных условиях, так и в условиях вакуума, радиации, при повышенной температуре и нагрузках, соизмеримых с напряжениями текучести материала основы, широко используют твердосмазочные покрытия (ТСП) на основе дисульфида молибдена, графита со связующими веществами типа ВНИИ НП, ВАП и др.

Цель работы — прогнозирование продолжительности приработки фрикционных сопряжений при произвольном сочетании нагрузочно-скоростных факторов в нормальных атмосферных условиях.

### Методика проведения и результаты исследований

Исследовали поверхности образцов с ТСП ВНИИ НП 212 в исходном и приработанном состояниях сканирующим рентгеновским микроскопом "Super Probe — 733" японской фирмы "JEOL" во вторичной электронной эмиссии при ускоряющем напряжении  $E = 25 \text{ кВ}$  и токе зонда  $I = 3 \cdot 10^{-8} \text{ А}$ .

Экспериментальную оценку ресурса и теплофрикционных характеристик осуществляли на модернизированной установке для проведения комплексных испытаний на трение при повышенной температуре с бесступенчатой регулировкой параметров трения [2]. Непрерывно записывали значения коэффициента  $f_{tr}$  и температуры трения  $T_{tr}$ . Исследовали пару трения с ТСП ВНИИ НП 212 (на основе MoS<sub>2</sub> с мочевиноформальдегидной связкой). Материал контртела —

закаленная сталь ХВГ (60 HRC). Для получения комплексной модели эксперимент проводили с использованием ротатабельного планирования второго порядка.

Рентгеновское сканирование контактной поверхности ТСП в исходном и приработанном состояниях показало, что в процессе приработки исходная структура поверхности ТСП претерпевает существенные изменения. Частицы  $\text{MoS}_2$ , хаотично закрепленные в связующем, после приработки ориентированы базисными поверхностями вдоль поверхности трения, обеспечивая низкий коэффициент трения (рис. 1).

Исследования динамики износа ТСП в процессе наработки показали, что вне зависимости от исходной толщины ТСП основная часть изношенного слоя (75...80 %) приходится на период приработки и лишь 20...25 % — на установившийся режим трения [3]. Исходная толщина ТСП (около 20 мкм) уменьшается настолько (2...5 мкм), что происходит контактирование наиболее высоких микронеровностей через смазочную пленку  $\text{MoS}_2$ .

На модернизированной машине трения получены диаграммы непрерывного изменения  $f_{\text{тр}}$  и  $T_{\text{тр}}$  (рис. 2). Период приработки сопровождается резким повышением  $f_{\text{тр}}$  и  $T_{\text{тр}}$  (в 1,5–2 раза) по сравнению с установленным уровнем. Процесс постепенного увеличения значений  $f_{\text{тр}}$  и  $T_{\text{тр}}$ , а затем резкого их снижения происходит многократно и наблюдался практически во всех экспериментах, что свидетельствует о периодическом накоплении в поверхностном слое усталостных

повреждений до критического состояния, после которого следует его отслоение. Такая динамика приработки заканчивается образованием тонкой смазочной пленки на поверхности из частиц  $\text{MoS}_2$ , обеспечивающей за счет связующих составляющих весь дальнейший ресурс трения ТСП.

Задачу оценки продолжительности приработки в нормальных атмосферных условиях для расчета при произвольном сочетании контактного давления  $p$  и скорости скольжения  $v$  решали с использованием ротатабельного планирования второго порядка. В качестве параметра оптимизации выбрана продолжительность периода приработки  $\tau_{\text{прир}}$ , которую оценивали по стабилизации коэффициента трения. Матрица планирования и результаты эксперимента представлены в таблице.

После проведения преобразований математическая модель  $\tau_{\text{прир}}$  в зависимости от нагрузочно-скоростных факторов в кодовом выражении имела вид:

$$Y = 22,4 - 30,36X_1 - 4,52X_2 + 1,39X_1X_2 + 17,73X_1^2 - 3,66X_2^2, \quad (1)$$

где  $Y$  — параметр оптимизации ( $\tau_{\text{прир}}$ ) в кодовом выражении;

$X_1, X_2$  — скорость скольжения и контактная нагрузка в кодовом выражении.

Наибольшее влияние на продолжительность приработки оказывает скорость скольжения пары

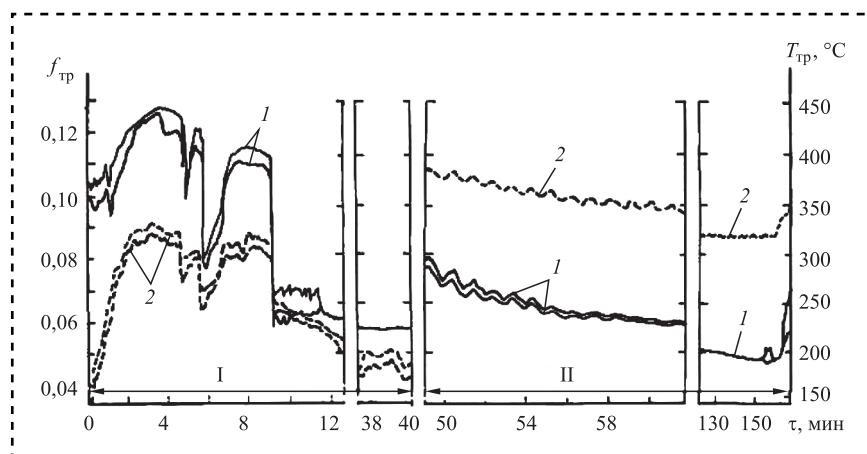


Рис. 2. Изменение  $f_{\text{тр}}$  (1) и  $T_{\text{тр}}$  (2) во времени при испытании пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 ( $v = 0,66 \text{ м/с}$ ,  $p = 72,8 \text{ МПа}$ ,  $T_{\text{об}} = 120^\circ\text{C}$ ). Стрелками показаны границы: I — приработка; II — наработка при нагреве

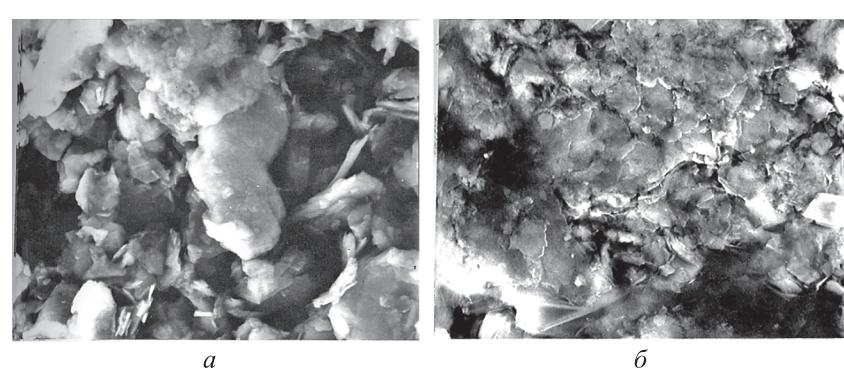


Рис. 1. Структура исходной (а) и приработанной (б) поверхностей образца с ТСП,  $\times 4000$



**Матрица планирования и результаты экспериментов  
при исследовании прирабатываемости пары трения  
с ТСП ВНИИ НП 212 в нормальных атмосферных условиях**

№ пп	В кодовом масштабе		В натуральном масштабе		$\tau_{\text{прир.}}$ , мин	$T_{\text{тр.прир.}}$ , °C
	$X_1$	$X_2$	v, м/с	$N \cdot 9,8, H$		
1	-1	-1	0,26	40	62	110
2	+1	-1	1,06	40	12	182
3	-1	+1	0,26	120	51	122
4	+1	+1	1,06	120	6,55	215,5
5	-1,41	0	0,096	80	115	99
6	+1,41	0	1,224	80	9	218
7	0	-1,41	0,66	23,6	26	160
8	0	+1,41	0,66	136,4	12	178
9	0	0	0,66	80	19	175
10	0	0	0,66	80	20	167
11	0	0	0,66	80	23,7	160
12	0	0	0,66	80	22,5	167
13	0	0	0,66	80	23	146

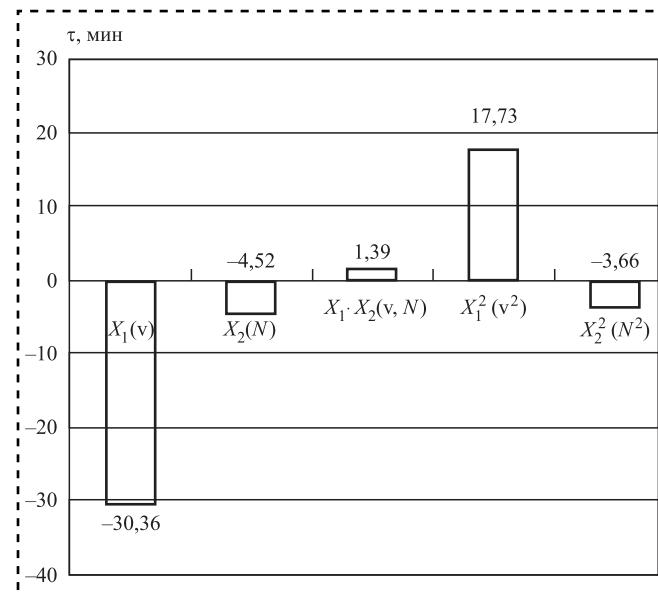
трения, определяющая температурный режим рассматриваемого фрикционного сопряжения (рис. 3).

После преобразования кодовых значений факторов в натуральный масштаб математическая модель (1) для оценки продолжительности приработки в нормальных атмосферных условиях в зависимости от скорости скольжения и контактного давления (расчитывали с учетом площади контактной дорожки трения, измеренной после соответствующего эксперимента) приняла следующий вид:

$$\tau_{\text{прир.}} = 116 - 225,7v + 0,32p + 0,008vp + 110,8v^2 - 0,0031p^2, \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{прир.}}$  — продолжительность приработки, мин; v — скорость скольжения пары трения, м/с; p — контактное давление, МПа.

Графическая интерпретация полученной зависимости представлена на рис. 3 на стр. 3 обложки. Анализ модели показывает монотонно возрастающую продолжительность приработки при снижении факторов скорости скольжения и контактного давления.

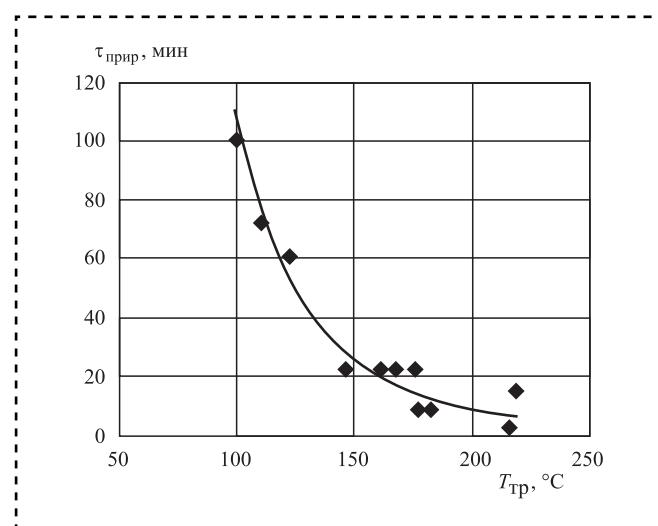


**Рис. 3. Значимость отдельных факторов на продолжительность приработки пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 в нормальных атмосферных условиях**

В целях установления возможной корреляционной связи продолжительности приработки с температурой трения приработки с использованием данных таблицы получена зависимость:

$$\tau_{\text{прир.}} = 10^{-9} \cdot T_{\text{тр.}}^{-3,53}. \quad (3)$$

Анализ приведенной на рис. 5 зависимости (3) показывает, что при  $T_{\text{тр.}} < 120 \dots 160$  °C процесс истирания носит абразивный характер, так как данный диапазон температур недостаточен для размягчения связки и ориентации частиц  $\text{MoS}_2$  вдоль



**Рис. 5. Изменение  $\tau_{\text{прир.}}$  в зависимости от  $T_{\text{тр.}}$  во время приработки пары с ТСП ВНИИ НП 212 для нормальных атмосферных условий**

поверхности трения. Поэтому режимы приработки должны обеспечивать  $T_{\text{тр}} > 120 \dots 160^{\circ}\text{C}$ , но не превышать температуру разрушения ТСП, определяемую температурой деструкции пленкообразующей связки.

Продолжительность приработки  $\tau_{\text{прир}}$  может составлять от общего ресурса работы пары трения с ТСП от 1 до 7 %.

В настоящее время в исследовательской практике чаще всего время окончания периода приработки оценивают по стабилизации  $f_{\text{тр}}$  после приработки [1]. Такой способ не позволяет точно установить момент ее окончания во время проведения испытаний из-за разброса экспериментальных результатов по  $f_{\text{тр}}$ , достигающих при испытаниях пар с ТСП 15 %. В каждом опыте заранее не известно значение  $f_{\text{тр}}$  на установившемся режиме.

Для повышения точности и эффективности определения времени окончания приработки пары трения скольжения разработан способ, основанный на явлении "стоп-эффекта". В основу способа положено свойство повышенной химической активности неприработанной поверхности пары трения скольжения по сравнению с приработанной структурой поверхностного слоя, соответствующей установленному режиму трения [4]. Данное свойство проявляется в повышенной окислительной способности неприработанной пары трения скольжения, а именно — в образовании оксидов на поверхности во время останова фрикционного сопряжения, что приводит к резкому повышению  $f_{\text{тр}}$  после возобновления скольжения.

Провели испытания ТСП ВНИИ НП 212 и 213 на модернизированной машине трения роликового типа при нагрузке  $N = 980$  Н и скорости скольжения  $v = 0,492$  м/с на образцах, изготовленных из закаленной стали ШХ15, на установившемся режиме трения с остановами длительностью  $\Delta\tau = 1, 2, 3, 6, 12, 20$  мин и 1 сутки. При возобновлении скольжения после остановов длительностью до 2 мин увеличение  $f_{\text{тр}}$  практически не наблюдали. При большей длительности остановов вследствие окисления поверхности имело место возрастание  $f_{\text{тр}}$  после возобновления скольжения до  $f_{\text{тр.с.э.}}$  (рис. 6).

По мере наработки тепло, возникающее при трении, удаляло окислившийся слой, и  $f_{\text{тр}}$  снижался до установленногося значения  $f_{\text{тр.уст.}} =$

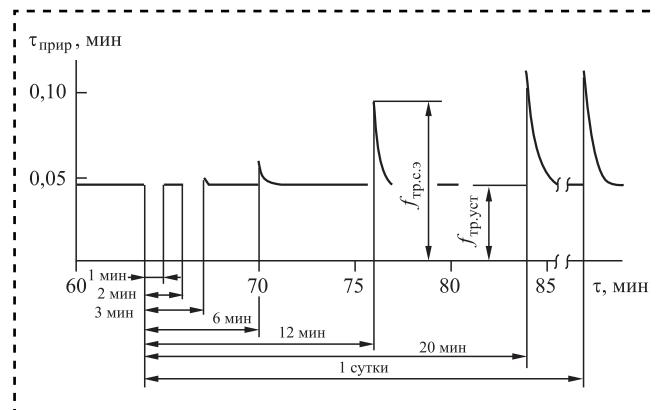


Рис. 6. Изменение  $f_{\text{тр}}$  в зависимости от длительности остановов на установившемся режиме трения для пары с ТСП ВНИИ НП 212

$= 0,046$ . При  $\Delta\tau > 20$  мин  $f_{\text{тр}}$  после возобновления скольжения не возрастал, что свидетельствовало о полной окисляемости поверхности трения в период останова  $\Delta\tau = 20$  мин.

Аналогичные испытания с различной длительностью остановов провели на режиме приработки. Установили длительность останова пары трения скольжения для ТСП ВНИИ НП 212 и 213  $\Delta\tau = 1$  мин, когда с возобновлением скольжения увеличение  $f_{\text{тр}}$  наблюдали лишь на режиме приработки (рис. 7), что позволило точно установить время ее окончания. Предложенный способ, основанный на свойстве повышенной окислительной способности неприработанной поверхности пары трения скольжения, не зависит от разброса экспериментальных результатов по  $f_{\text{тр}}$  на установившемся режиме и, следовательно, позволяет повысить точность и

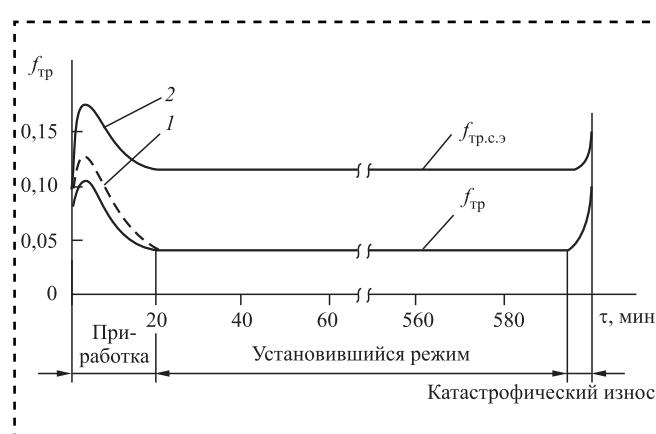


Рис. 7. Изменение  $f_{\text{тр}}$  и  $f_{\text{тр.с.э.}}$  в процессе наработки при длительности остановов:  
1 —  $\Delta\tau = 1$  мин; 2 —  $\Delta\tau = 20$  мин



надежность определения времени окончания приработки. Способ отличается универсальностью и простотой, так как, во-первых, позволяет качественно определять время окончания приработки для любых схем трения вне зависимости от их конструктивного выполнения и, во-вторых, не требует дополнительного оборудования и измерительных средств.

Способ реализуется в следующей последовательности:

1. Предварительный этап: определение останова пары трения в приработанном состоянии минимальной длительности  $\Delta t_{\min}$ , не вызывающего "стоп-эффекта" при возобновлении скольжения.

2. Рабочий режим трения: остановы пары трения на  $\Delta t_{\min}$  после стабилизации коэффициента трения  $f_{tr}$ :

- измерение  $f_{tr}$  при возобновлении скольжения;
- $f_{tr, \text{возобн}} > f_{tr, \text{стабил}}$  — продолжение приработки;
- $f_{tr, \text{возобн}} = f_{tr, \text{стабил}}$  — фиксация окончания приработки.

Предложенный способ защищен авторским свидетельством [4] и внедрен на предприятии "БЕЛАЗ" (Беларусь).

### Заключение

Выявлено, что период приработки пар трения с ТСП на основе антифрикционных наполнителей со связующими смолами сопровождается резким повышением в 1,5–2 раза коэффициента и температуры трения по сравнению с установленным уровнем.

Получена комплексная модель второго порядка для расчета продолжительности приработки пар трения скольжения с ТСП ВНИИ НП 212

в нормальных атмосферных условиях с произвольным сочетанием скорости скольжения и контактного давления при варьировании скорости скольжения  $v = 0,26...1,06$  м/с, контактного давления  $p = 44,4...101$  МПа.

Показано, что наибольшее влияние на продолжительность приработки в нормальных атмосферных условиях оказывает скорость скольжения пары трения.

Выявлена корреляционная зависимость продолжительности приработки  $\tau_{\text{прир}}$  и температуры трения в процессе приработки пары с ТСП.

В целях повышения точности и эффективности определения времени окончания приработки пары трения скольжения разработан способ, основанный на свойстве повышенной окислительной способности неприработанной поверхности пары трения скольжения; предложенный способ не зависит от разброса экспериментальных результатов по  $f_{tr}$  на установившемся режиме и позволяет повысить точность и надежность определения времени окончания приработки.

### Библиографический список

1. Карасик И.И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. М.: Наука, 1978. 136 с.
2. Хопин П.Н. Комплексная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования. М.: МАТИ, 2012. 255 с.
3. Хопин П.Н. Исследование прирабатываемости пар трения с твердосмазочными покрытиями // Технология машиностроения. 2011. № 7 (109). С. 44–49.
4. А. с. 1059485 СССР. Способ определения времени приработки / О.В. Попов, П.Н. Хопин, А.Ф. Волков, В.А. Комаров., опубл. 1983. Бюл. № 45.



УДК 621.313.17

**Ф.Р. Исмагилов, д-р техн. наук, В.Е. Вавилов, канд. техн. наук,  
В.И. Бекузин, В.В. Айгузина**  
(Уфимский государственный авиационный технический университет)  
E-mail: tioaldo1@rambler.ru

## Удельные потери сплава 49К2ФА в магнитопроводе статора ЭМПЭ\*

Приведено экспериментальное и аналитическое исследование удельных потерь прецизионного магнитно-мягкого сплава 49К2ФА на высоких частотах перемагничивания (свыше 400 Гц). Эмпирическим путем получена аналитическая функция зависимости удельных потерь в прецизионном магнитно-мягком сплаве 49К2ФА от магнитной индукции в диапазоне частот перемагничивания до 2000 Гц.

*Presents experimental and analytical study of specific losses of precision soft magnetic alloy 49K2FA magnetization reversal at high frequencies (above 400 Hz). Analytic function depending on specific losses in precision magnetic alloy 49K2FA of magnetic induction in the range of magnetic reversal frequencies up to 2000 Hz empirically derived.*

**Ключевые слова:** удельные потери в стали, прецизионные магнитно-мягкие сплавы, 49К2ФА.

**Keywords:** specific losses in steel, precision soft magnetic alloys, 49K2FA.

Прецизионный магнитно-мягкий сплав 49К2ФА характеризуется высокой индукцией насыщения 2,2 Тл, относительно невысокими удельными потерями  $P_{1,8/400} = 25,0$  Вт/кг (ГОСТ 10160—75). При использовании сплава в качестве магнитопровода статора электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) актуальным становится вопрос определения удельных потерь при различных частотах перемагничивания (свыше 400 Гц), поскольку такие данные отсутствуют в ГОСТ и ТУ. Использование аналитических расчетов часто сопровождается большими неточностями, связанными с выбором размерных коэффициентов потерь на гистерезис и вихревые токи.

Цель работы — определение удельных потерь на частотах перемагничивания выше 400 Гц,

разработка аналитической модели, выбор размерных коэффициентов потерь на гистерезис и вихревые токи прецизионного магнитно-мягкого сплава 49К2ФА.

Исследования проводили по методике РЭ 4276.020.20872624.2009 на модернизированной установке МК-4Э, позволяющей измерять потери в стали в диапазоне частот до 3000 Гц, в нормальных климатических условиях при температуре образцов не более 23 °С, относительной влажности воздуха 25 %. Массу образцов измели на электронных весах с погрешностью не более 0,01 г.

Результаты, полученные с помощью модернизированной установки МК-4Э на частоте 400 Гц для прецизионного магнитно-мягкого сплава 49К2ФА толщиной 0,08 мм  $P_{1,8/400} = 26,8$  Вт/кг, сопоставимы со значениями, указанными в ГОСТ 10160—75  $P_{1,8/400} = 25,0$  Вт/кг.

Измерения удельных потерь провели для частот перемагничивания 500, 750, 1000 и 2000 Гц (рис. 1 на стр. 3 обложки).

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-38-00005 "Исследования электромагнитных и тепловых процессов, а также их взаимовлияния в термоинерционных электромеханических преобразователях энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами".



## Разработка аналитической модели

С помощью программного комплекса Matlab аппроксимировали эмпирические графики для получения аналитической зависимости функции удельных потерь от частоты перемагничивания ( $P_{уд} = f(B)$ ):

$$\begin{aligned} P_{500} &= 14,36B^{1,5}; \\ P_{750} &= 23,83B^{1,5}; \\ P_{1000} &= 33,35B^{1,5}; \\ P_{2000} &= 80,63B^{1,5}. \end{aligned} \quad (1)$$

Полученные функции имеют вид  $P(f, B) = A(f)B^{1,5}$ . Чтобы вывести аналитическую функцию зависимости  $A = f(f)$ , для наглядности построили эмпирический график (рис. 2).

Путем аппроксимации графика  $A = f(f)$  получена функция

$$A = 0,006f^{1,242}. \quad (2)$$

Подставив функцию (2) в функцию зависимости удельных потерь от частоты перемагничивания и магнитной индукции  $P(f, B) = A(f)B^{1,5}$ , приходим к формуле

$$P = 0,006f^{1,242}B^{1,5}. \quad (3)$$

Приведем функцию (3) к удельным потерям по ГОСТ 10160—75:

$$P = 24 \cdot 10^{-5} P_{1,8/400} f^{1,242} B^{1,5}. \quad (4)$$

Сопоставили экспериментально полученные графики и расчетную формулу (4) (рис. 3 на стр. 3 обложки). Отклонение экспериментальных данных от расчетных составляет не более 8 %, характер расчетных и экспериментальных функций одинаков для всего диапазона частот перемагничивания, что свидетельствует о правильности рассуждений.

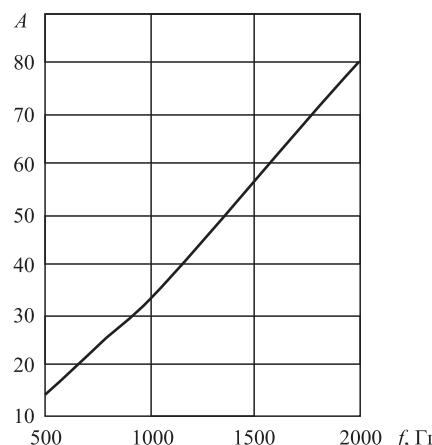


Рис. 2. Эмпирический график зависимости  $A = f(f)$

## Заключение

Получена аналитическая функция зависимости удельных потерь в прецизионном магнитно-мягком сплаве 49К2ФА от магнитной индукции в диапазоне частот перемагничивания до 2000 Гц. Погрешность полученной зависимости составляет не более 8 %. Полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании высокоскоростных ЭМПЭ.

## Библиографический список

1. Daniel M. Saban, Cassandra Bailey, Delvis Gonzalez-Lopez, Ladislau Luca Experimental Evaluation of a High-speed Permanent-magnet Machine // Proceedings of the thirty-eighth turbomachinery symposium. 2009.
2. Co Huynh, Liping Zheng. Dipjyoti acharya lossesin high speed permanent magnet machines used in microturbine applications // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2009. Vol. 131. Issue 2. P. 1—6.
3. Limits A.B. Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines. Netherlands. 2011. 209 p.
4. Vacuumschmelze. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vacuumschmelze.com/> (дата обращения: 25.02.2016).



**В.М. Труханов, д-р техн. наук, Ю.И. Крыхтин, канд. техн. наук, А.С. Романовский**  
(Волгоградский государственный технический университет)  
E-mail: trukhanov1939@mail.ru

## Технологические основы разработки и изготовления заготовок фрикционных дисков с молибденовым газотермическим покрытием

Рассмотрены фрикционные "родственные" металлические пары (сталь — сталь, чугун — чугун, сталь — чугун и др.) применяются при работе со смазкой для реализации прочностных качеств и особенно фрикционной эффективности подвижного соединения. Они характеризуются нестабильным коэффициентом трения, резко понижающимся с повышением скорости скольжения и температуры, склонностью к схватыванию при высоких температурах.

Friction "allied" metal pairs (steel — steel, cast iron — cast iron, steel — cast iron and others), which still find some use at work with lube owing to realization of strength properties and especially friction efficiency of movable joint. They are characterized by unstable friction coefficient, falling abruptly with increase of sliding speed and temperature, tendency to pick up at high temperatures are considered.

**Ключевые слова:** заготовка, диск трения, газотермическое покрытие, трение в масле, трансмиссия.

**Keywords:** stock, friction disk, gas-thermal coating, friction in oil, transmission.

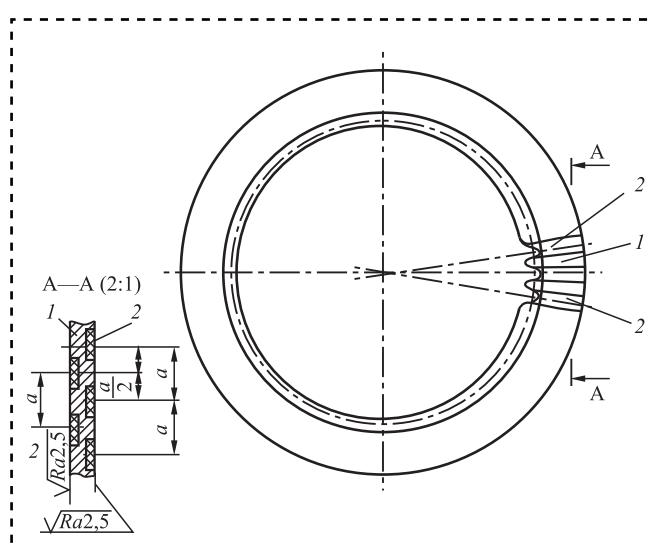
Для исключения процессов схватывания на фрикционном стальном контакте, характерных для однородных трущихся материалов, повышения надежности и долговечности работы фрикционных узлов, используют новые конструктивные и технологические решения, к которым можно отнести применение пористых фрикционных спеченных материалов и газотермических покрытий.

Метод плазменного напыления позволяет получить различные по составу газотермические покрытия,очно связанные с основным металлом детали. Этот способ позволяет объединить процессы формирования и спекания конгломерированных частиц на напыленных поверхностях.

Широкое распространение для работы в масле нашли пористые спеченные фрикционные материалы на основе меди, легированные оловом или цинком — материал типа МК-5. Фрикционные накладки из этого материала прессуют и спекают с основой под давлением. Спеченный фрикционный материал МК-5 ТУ 14-1-1291-75 хорошо зарекомендовал себя при работе по стали в условиях смазки во фрикционных узлах транспортных гусеничных и колесных машин. Этот материал имеет ряд недостатков: наличие в составе дорогостоящих компонентов

(медь, свинец, олово и др.), низкий коэффициент трения, значительная трудоемкость при изготовлении.

Рассмотрели молибденовые газотермические покрытия, наносимые на стальные диски методом плазменного напыления [1].



**Рис. 1. Диск трения:**

1 — основа диска; 2 — фрикционный материал;  $a$  — шаг торцевых пазов



Таблица 1

## Условия работы дисков трения в МПП гусеничной машины

Показатель	Агрегат МПП		
	Тормоз-синхронизатор	Водометный двигатель	Передачи 2—5 в коробке передач
Удельная работа трения за одно включение фрикционной муфты $A_{\text{ул.тр.}}$ , Дж/м <sup>2</sup>	29	465	1171...290
Линейная скорость скольжения диска фрикционного относительного контролера на максимальном радиусе трения $v$ , м/с	7,17	27	7,06...8,61
Рабочее давление на поверхности трения $q$ , МПа	3,3	2,87	3,6...3,1
Время буксования и включения фрикционной муфты $t_{\text{бук.}}$ , мин	0,03	0,2	1,17...0,31
Температура в зоне трения, °С:			
средняя за процесс буксования $T$	106	144	192...171
средняя продолжительная $T_{\text{ср}}$		400...500	
допустимая максимальная (кратковременная) $T_{\text{доп}}$		700...800	
Диапазон рабочих температур, °С		—60...+800	
Число переключений $n_{\text{пер}}$	640	50	960, 1152, 1344, 2624

Примечание. Испытания проводят в масле ТСЗп-8 по ТУ 38-1011280—89.

Работа выполнена Волгоградским тракторным заводом совместно с Институтом проблем материаловедения НАН Украины. Подбор состава фрикционного материала и напыление его на основу проводили в ИПМ [2].

Рабочая поверхность такого диска с комбинированной поверхностью трения включает в себя чередующиеся участки плотного беспористого стального материала и пористого антизадирного материала (рис. 1). При трении диска в масле со стальным контролером (сталь 65Г ГОСТ 1050—2013; 285...321 НВ) при больших скоростях скольжения и удельных давлениях на фрикционном контакте стальные участки диска обеспечивают высокий коэффициент трения, особенно в условиях полусухого трения (в режиме граничного трения), а пористые участки — антизадирные качества соединению. Частицы пористого материала с маслом при трении переносятся на стальные участки, намазываются на них и препятствуют износу, задиранию, прихватыванию и спеканию поверхностей трения, что повышает надежность и долговечность работы узла с высоким коэффициентом трения при работе в масле.

Условия работы дисков трения в механизме передач и поворота (МПП) гусеничной машины приведены в табл. 1.

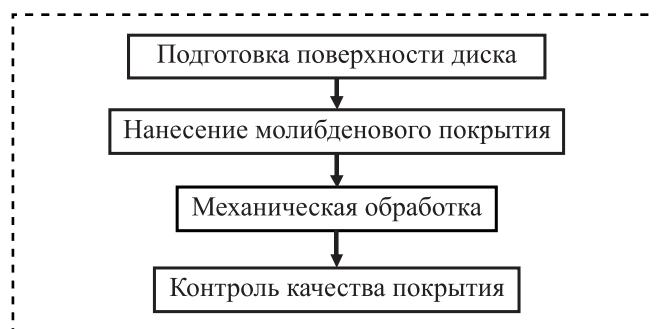


Рис. 2. Схема изготовления заготовок дисков трения

Технологическая схема изготовления заготовок дисков трения представлена на рис. 2.

## Материалы для изготовления молибденового покрытия дисков

Аргон газообразный чистый марки "А" (ГОСТ 10157—79).

Азот газообразный чистый (ГОСТ 9293—74).

Проволока молибденовая диаметром 1,4...1,8 мм марки МЧ МРН (99 % Mo) (ТУ 48-19-203—85).

Дробь техническая колотая из чугуна или стали марок ДЧК, ДСК фракции 0,5...1,0 (ГОСТ 11964—81).

Вода для охлаждения под давлением 0,4...0,7 МПа (4...7 атм).



Сжатый воздух под давлением 0,5...0,7 МПа, допустимые классы загрязнения 3, 5, 7, 9 (ГОСТ 17433—80).

Нефрас С3 80/120.

### Технологический процесс изготовления заготовок дисков

**1. Подготовка поверхности диска к нанесению покрытия.** В вытяжном шкафу обезжиривают диск погружением его на 0,5...1 мин в ванну с нефрасом. Затем извлекают из ванны и сушат. Просушенные диски выгружают из вытяжного шкафа и укладывают на стеллаж.

Проводят дробеструйную обработку поверхностей диска.

Лист фильтровальной бумаги устанавливают напротив дробеструйного пистолета, перекрывают подачу дроби и открывают вентиль подачи воздуха (предварительно проверив чистоту и влажность сжатого воздуха). Если в течение 15 мин бумага останется чистой, тогда можно приступить к дробеструйной обработке поверхностей, на которые будет наноситься покрытие.

Устанавливают диск в дробеструйную камеру и закрепляют его. Включают вытяжную вентиляцию, открывают вентиль подачи сжатого воздуха (давление 0,55...0,65 МПа) и посредством тяг управления плавно перемещают дробеструйный пистолет относительно обрабатываемой поверхности. Дробеструйная обработка поверхности будет окончена, когда исчезнут блестящие участки и поверхность приобретет серебристо-матовый оттенок.

**2. Нанесение покрытия.** Молибденовую проволоку обезжиривают (промывают в нефрасе), высушивают под вытяжкой и наматывают на катушку подающего редуктора.

Устанавливают диск в камере напыления и закрепляют его в устройстве для напыления (рис. 3).

В табл. 2 приведены размеры устройства для напыления дисков двух типоразмеров: диск диаметром 176 мм для тормоза-синхронизатора и 216 мм для фрикционов переключения передач

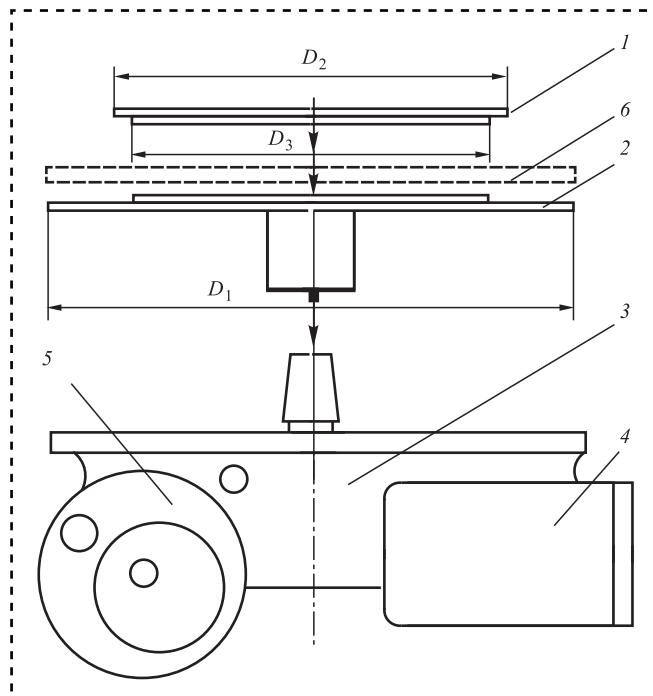


Рис. 3. Устройство для напыления дисков:

1 — крышка; 2 — основание; 3 — редуктор; 4 — электродвигатель для поворота диска при напылении фрикционного материала; 5 — ручной привод; 6 — фрикционный диск;  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  — размеры устройства для напыления. Стрелками показаны связи узлов и деталей в устройстве

в гидромеханической трансмиссии гусеничной машины (рис. 4).

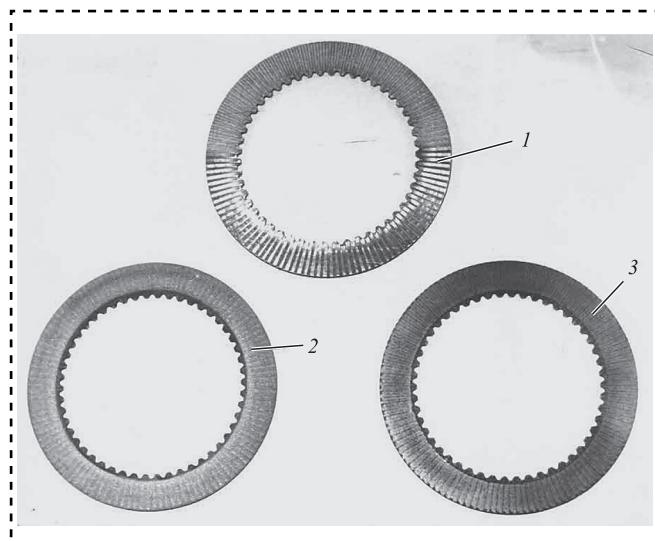
Подготавливают плазменную установку УПУ-3 производства Ржевского электромеханического завода к работе и устанавливают дистанцию напыления 90...100 мм.

Включают вытяжную вентиляцию, плазменную установку, регулируют режим работы: напряжение 35...40 В, сила тока 490...510 А, расход плазмообразующего газа (аргон) 27..32 л/мин, давление плазмообразующего газа 0,35...0,40 МПа, скорость подачи молибденовой проволоки 20...25 единиц по нониусу и проверяют качество распыляемого металла. Для этого полосу листовой стали размером  $(300 \pm 5) \times (50 \pm 3) \times (2 \pm 1)$  мм обезжиривают в нефрасе, проводят дробеструйную обработку ее поверхности, вводят в струю распыляемого металла

Таблица 2

Размеры оснастки для напыления дисков, мм

Диаметр диска, мм	$D_1$	$D_2$	$D_3$
216	$215 \pm 0,1$	$168 \pm 0,1$	$158 \pm 0,2$
176	$175 \pm 0,1$	$133 \pm 0,1$	$125 \pm 0,2$

**Рис. 4. Диски диаметром 216 мм:**

1 — стальная основа; 2 — заготовка с железо-алюминиевым покрытием; 3 — заготовка с молибденовым покрытием (до механической обработки шлифованием)

на расстоянии 100...110 мм от среза сопла на 5...10 с, выключают установку и проверяют качество распыления. Напыленный слой должен иметь частицы формы расплошнотой капли.

Включают устройство для напыления дисков, обеспечивая диску скорость вращения 38...62 рад/с (6...10 мин<sup>-1</sup>).

Подводят плазмотрон к диску, включают плазменную установку и подачу молибденовой проволоки на распыление, совмещают пятно напыления с напыляемой поверхностью диска.

Толщина напыленного молибденового покрытия должна быть равна (0,1 ± 0,02) мм по

всей поверхности напыления. Если нет требуемого размера, то необходимо повторить напыление. В дальнейшем использовать при напылении скорректированное время напыления. Диск снимают с устройства и укладывают его на стеллаж: длина 1300 мм; ширина 700 мм; высота 750 мм.

**3. Механическая обработка покрытия.** Шлифуют диски на плоскошлифовальном станке по следующему режиму: скорость резания 30...35 м/с; глубина резания 0,08...0,1 мм; поперечная подача 0,9...1,1 мм/проход; охлаждающая жидкость — эмульсия.

**4. Контроль качества покрытия.** После шлифования поверхность покрытия диска не должна иметь сколов, трещин, раковин.

В табл. 3 приведены нормы технологического режима при изготовлении заготовок молибденовых дисков трения.

**Расчетные нормы расхода сырья, материалов и энергоресурсов для изготовления заготовок молибденовых дисков диаметром 176/216 мм**

Аргон газообразный, м <sup>3</sup> . . . . .	0,480/0,600
Проволока молибденовая, кг . . . . .	0,260/0,35
Дробь техническая, кг . . . . .	0,020/0,030
Технологическая вода, м <sup>3</sup> . . . . .	0,400/0,500
Сжатый воздух, м <sup>3</sup> . . . . .	20,00/28,00
Нефрас, кг . . . . .	0,010/0,012
Производительность напыления по молибдену, кг/ч . . . . .	1,1/1,1
КПД использования молибдена . . . . .	0,8/0,8
Потребляемая мощность, кВт . . . . .	27,5/27,5
Расход электроэнергии, МДж (кВт·ч) . . .	27 (7,33)/33 (9,17)

**Таблица 3****Нормы технологического режима**

Операция	Продолжительность, мин, для диска диаметром, мм		Температура, °C	Примечание
	176	216		
Обезжикивание диска и его сушки	5	5	25 ± 10	Погружать на 0,5...0,1 мин в нефрас
Установка диска в дробеструйную камеру	1	1		—
Дробеструйная обработка	4	6		—
Выгрузка диска из дробеструйной камеры	1	1		—
Установка диска в камеру напыления	2	2		—
Нанесение покрытия методом плазменного напыления	16	20	10 000	—
Выгрузка диска из камеры напыления	2	2	25 ± 10	—
Шлифование диска	10	12		—



## Технический паспорт заготовок фрикционных дисков, изготовленных по технологии плазменного напыления

1. Поверхность трения: 85 % площади — молибденовое покрытие; 15 % площади — сталь 65Г ГОСТ 1050—2013; состав покрытия — 100 % молибден ТУ 48-10-203—85.

2. Физико-механические свойства молибденового покрытия:

твердость — 4800...5200 МПа (480...520 кгс/см<sup>2</sup>) по Виккерсу;

пористость — 18...21 % (плотность 8,20...8,15 г/см<sup>3</sup>);  
адгезионная прочность — не менее 22 МПа.

3. Геометрические размеры заготовки, мм:

наружный диаметр  
по покрытию . . . . . 176/216

внутренний диаметр  
по покрытию . . . . . 133/168

толщина покрытия  
на сторону . . . . . (0,7 ± 0,05)  
общая толщина . . . . . (4,8 ± 0,05)/(4,5 ± 0,05).

4. Фрикционные характеристики согласно испытаниям на машине трения МТ-68 (скорость скольжения — 10 м/с, удельное давление — 4 МПа; вид трения — в условиях ограниченной подачи масла ТСЗп-8 ТУ 38-1011280—89):

коэффициент трения ≥ 0,15;  
температура износа в паре со сталью 65Г — не более 5 мкм/км.

5. Режим напыления:

сила тока — 500 А;  
напряжение — 40 В;  
дистанция — 105 мм;  
плазмообразующий газ — аргон;  
расход газа — 30 л/мин.

6. Режим механической обработки (шлифовки):  
шлифовальный круг — эльбор;  
глубина резания — 0,1 мм;  
скорость резания — 30....35 м/с;  
поперечная подача — 0,5 мм/проход;  
охлаждающая жидкость — СОЖ.

## Заключение

Приведенные технологические основы разработки фрикционных дисков с комбинированной поверхностью трения для работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин способствуют ускорению освоения производства прогрессивной продукции в современных условиях на предприятиях.

## Библиографический список

1. Триботехнические свойства газотермических молибденовых и бронзовых покрытий / А.В. Шабалин и др. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1991. № 1. С. 48—50.

2. Порошковая металлургия. Материалы, технологии, свойства, области применения: справочник / И.М. Федорченко и др. Киев: Наукова думка, 1985. 623 с.



УДК 621.1.0-753: 621.838.222

**М.П. Шишкарев, д-р техн. наук, Чан Ван Дык**  
 (Донской государственный технический университет)  
 E-mail: shishkarevm@mail.ru, ductranvan2311@gmail.com

## Элементы теории тепловых процессов в аддативной фрикционной муфте с раздельным силовым замыканием

Определены варианты движения привода машины с буксованием аддативной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием, имеющие различные показатели теплового режима.

На основе моделирования процесса нагрева пар трения аддативной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием при наименее выгодном варианте буксования получены зависимости для расчета избыточной температуры на поверхностях трения, необходимые на стадии проектирования муфты данного типа.

*Identify options for the movement of the machine drive with adaptive slipping the clutch with a separate power circuit having different indices of thermal regime.*

*Based on the modeling of heating process adaptive friction clutch with a separate power circuit for the least favorable option of slipping the dependences for calculating the excess temperature on the friction surfaces required for the design stage of the coupler of this type.*

**Ключевые слова:** тепловой процесс, аддативная фрикционная муфта, нагрев, фрикционный материал, коэффициент трения.

**Keywords:** thermal process, adaptive friction clutch, heat, friction material, the coefficient of friction.

### Введение

Переход аддативных фрикционных муфт (АФМ) к буксованию вследствие действующих перегрузок в приводе машины приводит к образованию теплоты из-за трения между поверхностями фрикционных пар. Изменяющиеся из-за нагрева поверхностей трения условия влекут за собой соответствующие изменения характера процесса трения.

Предельная температура нагрева поверхностей фрикционных дисков сцепных управляемых муфт в переходные периоды работы не должна превышать 300...400 °C [1].

В отличие от сцепных управляемых фрикционных муфт, тепловые процессы в которых достаточно полно изучены, время буксования и, соответственно, нагрева поверхностей трения АФМ не вполне определены [2]. Это связано с тем, что АФМ выключает из работы в процессе

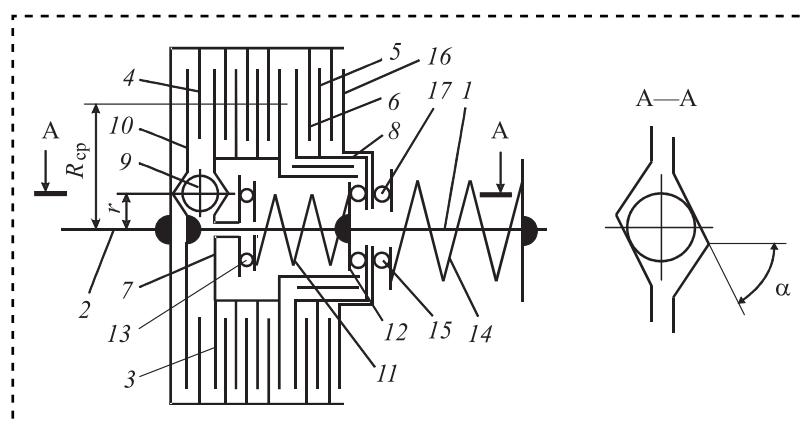
буксования чаще всего вручную оператор, обслуживающий машину, на основе визуального контроля работы ее механизмов.

Кардинальным способом своевременного отключения двигателя привода в начале буксования АФМ — установка специального устройства, реагирующего на начало срабатывания муфты. Такие устройства разработаны и успешно применяются за рубежом, однако в нашей стране достаточно широкого распространения не получили [3].

Цель работы — изучение влияния технических характеристик АФМ на их температурный режим при срабатывании.

Принципиальная схема АФМ второго поколения с раздельным силовым замыканием представлена на рис. 1. АФМ состоит из соосных одной другой полумуфт 1 и 2, кинематически связанных фрикционными группами:

- основной (ОФГ), состоящей из дисков трения 3 и 4;



**Рис. 1. Принципиальная схема АФМ второго поколения с автономным силовым замыканием**

— дополнительной (ДФГ), включающей диски трения 5 и 6.

Диски трения 3 и 5 связаны в окружном направлении со ступицей нажимного диска 7 и со стаканом 8, диски трения 4 и 6 — с барабаном полумуфты 2. Данные связи позволяют дискам свободно перемещаться в осевом направлении относительно сопряженных с ними элементов.

Стакан 8 связан в окружном направлении со ступицей нажимного диска 7 при помощи шлицевого соединения. Поскольку в процессе работы АФМ перемещение стакана относительно ступицы нажимного диска в осевом направлении отсутствует, силы трения в шлицевом соединении на характеристики муфты влияния не оказывают.

Управляющее устройство (УУ) муфты выполнено в виде тел качения 9, которые размещены в скошенных гнездах, расположенных на обращенных друг к другу торцах нажимного диска и упорного диска 10, жестко смонтированного на ступице полумуфты 1 (см. рис. 1, сечение А—А).

В рассматриваемой АФМ реализовано "автономное" силовое замыкание, когда пары трения ОФГ замыкаются от пружины 11, опирающейся справа на упор 12, жестко закрепленный на ступице полумуфты 1. Для уменьшения влияния трения между пружиной 11 и нажимным диском установлен упорный подшипник 13.

Пары трения ДФГ замыкаются при помощи пружины 14, которая воздействует на них посредством упорного подшипника 15 и нажимного фланца 16.

Для того чтобы пружина 14 не оказывала влияния на пары трения ОФГ, стакан 8 слева (см. рис. 1) опирается через упорный подшипник 17 на упор 12.

В работе [4] найдена формула для вычисления вращающего момента АФМ:

$$T_{\pi} = F_{\pi 2} R_{cp} f \frac{zn + z_1 - z_1 Cf(z - z_2)}{1 + z_2 Cf}, \quad (1)$$

где  $F_{\pi 2}$  — сила натяжения пружины 14;

$R_{cp}$  — средний радиус поверхностей трения ОФГ;

$f$  — коэффициент трения между парами ОФГ;

$z$  — число пар поверхностей трения ОФГ;

$z_1$  — число пар поверхностей трения ДФГ;

$z_2$  — число ведущих пар трения ОФГ, непосредственно связанных с нажимным диском;

$C$  — коэффициент усиления (КУ) обратной связи,  $C = \frac{R_{cp}}{r} \operatorname{tg} \alpha$ ;

$\alpha$  — угол скоса гнезд под тела качения 9 УУ (см. рис. 1, сечение А—А);

$r$  — радиус окружности, на которой расположены тела качения УУ;

$n$  — коэффициент,  $n = \frac{F_{\pi 1}}{F_{\pi 2}}$ ;

$F_{\pi 1}$  — сила натяжения пружины 11.

Срабатывание АФМ заключается в переходе пар трения ОФГ и ДФГ из состояния относительного покоя в состояние относительного движения (скольжения) в результате действия перегрузки в приводе машины, характеризуется следующими особенностями:

— скачком момента сил трения между парами ОФГ и ДФГ, приводящим к его уменьшению вследствие того, что  $f_{\pi} > f_c$  ( $f_{\pi}$  и  $f_c$  — коэффициенты трения покоя и скольжения); момент сил трения АФМ изменяется непропорционально изменению коэффициента трения, в отличие от предохранительных фрикционных муфт обычной точности срабатывания [5];

— изменением с ненулевой фазой распорной силы в соответствии со скачком момента сил трения [6] и возникновением колебаний в механической системе АФМ.



Выбором определенного КУ амплитуда колебаний может уменьшаться с течением времени буксования [7, 8].

Считаем, что

$$T_{\text{п}} > T_{\text{c}},$$

где  $T_{\text{c}}$  — момент сил трения АФМ при буксовании,

$$T_{\text{c}} = R_{\text{cp}} f_{\text{c}} F_{\text{n2}} \frac{zn + z_1 - z_1 C f_{\text{c}} (z - z_2)}{1 + z_2 C f_{\text{c}}}. \quad (2)$$

Когда процесс буксования предохранительных фрикционных муфт, в том числе АФМ, продолжается в течение некоторого времени, достаточного для изменения трибологических характеристик материалов пар трения, ему сопутствует изменение коэффициента скольжения в результате нагрева поверхностей трения.

Различные сочетания материалов пар трения, применяемых в АФМ, по-разному реагируют на нагрев, с точки зрения изменения коэффициента трения:

- при нагреве коэффициент трения увеличивается до некоторого максимального значения, соответствующего определенной температуре нагрева, при дальнейшем увеличении температуры, — уменьшается (данному закону подчиняются, например, сочетания материалов, участвующих в процессе трения, — K-1, K-3, K-7, V-17, V-18 и др.);

- при нагреве коэффициент трения уменьшается до некоторого минимального значения при температуре 400...500 °C по приблизительно обратной зависимости, затем увеличивается (фрикционные материалы, поведение которых подчиняется указанной закономерности: — ретинакс марок ФК и другие asbestosодержащие материалы);

- коэффициент трения слабо реагирует на нагрев поверхностей трения, незначительно увеличиваясь или уменьшаясь по сравнению с исходной величиной (материалы МК-5 и МК-263).

### **Выбор фрикционного материала для обеспечения оптимального температурного режима АФМ**

Различные фрикционные материалы имеют неодинаковые закономерности изменения коэффициента трения в функции температуры нагрева трущихся поверхностей. В зависимости от назначения, особенностей работы механизмов и

протекающих в них процессов закономерность изменения коэффициента трения в функции температуры выбирают индивидуально.

Главное требование, предъявляемое к оптимизации процесса срабатывания предохранительных фрикционных муфт, в том числе и АФМ, — непревышение моментом сил трения при буксовании номинального вращающего момента муфты, на передачу которого производится ее настройка. При срабатывании предохранительные фрикционные муфты и АФМ в процессе буксования передают вращающий момент, меньший того момента, при котором происходит срабатывание муфты. Это связано с тем, что коэффициент трения скольжения фрикционных пар меньше коэффициента трения покоя.

Данный вывод справедлив в следующих случаях:

- если период времени буксования муфты короткий и повышение температуры нагрева поверхностей трения фрикционных пар не приводит к значительному увеличению коэффициента трения, период буксования муфты ограничен своевременным выключением привода машины вручную или автоматически;

- если фрикционные материалы предохранительной муфты или АФМ обеспечивают уменьшение коэффициента трения при повышении температуры нагрева поверхностей трения или его стабильную величину.

В целях оптимизации процесса буксования предохранительной фрикционной муфты или АФМ применяют в ее конструкции материалы, коэффициент трения которых уменьшается при нагреве поверхностей трения. Это создает определенную гарантию непревышения моментом сил трения муфты при буксовании вращающего момента при ее срабатывании (рис. 2).

В течение периода времени  $t_1$  муфта передает нагрузку, равную моменту  $T_{\text{н}}$ . Момент  $T_{\text{н}}$  может быть превышен, но менее чем до значения  $T_{\text{max}}$ , если текущее значение коэффициента трения между фрикционными парами муфты соответствует вращающему моменту, большему, чем его расчетная величина. При соблюдении данного условия срабатывание АФМ отсутствует.

По достижении перегрузки, равной разности  $T_{\text{max}} - T_{\text{н}}$ , и при условии соответствия текущего коэффициента трения вращающему моменту  $T_{\text{max}}$  предохранительная фрикционная муфта

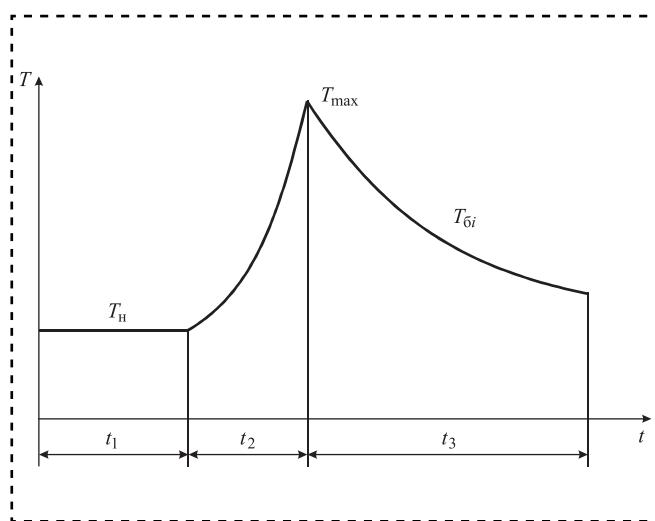


Рис. 2. Схема процесса срабатывания и буксования АФМ:

$T_n$  — номинальный вращающий момент АФМ;  $T_{\max}$  — максимальный вращающий момент при срабатывании муфты;  $T_{6i}$  — текущий вращающий момент при буксовании АФМ

или АФМ срабатывает при данной перегрузке, которой предшествует нарастание вращающего момента муфты в течение периода времени  $t_2$ .

При переходе в режим буксования предохранительной фрикционной муфты или АФМ благодаря тому, что момент трения скольжения меньше момента трения покоя, нагрузка, передаваемая муфтой при буксовании, уменьшается. Устойчивому уменьшению момента буксования  $T_{6i}$  в период времени  $t_3$  способствует также устойчивое снижение коэффициента трения в результате повышения температуры поверхностей трения АФМ.

В основу процесса срабатывания АФМ могут быть положены два возможных варианта движения привода машины:

— полная остановка ведомых (по отношению к АФМ) частей привода, включая рабочий орган машины;

— исключение полной остановки ведомых частей привода и рабочего органа машины в процессе буксования предохранительной фрикционной муфты или АФМ.

При этом справедливо следующее условие:

$$T_{6i} > T_c + T_i, \quad (3)$$

где  $T_c$  — момент сил сопротивления на ведомых (по отношению к предохранительной фрикционной муфте или АФМ) частях привода, включая

рабочий орган машины, приведенный к ведомому валу муфты;

$T_i$  — приведенный к ведомому валу муфты вращающий момент, необходимый для преодоления момента инерции ведомых частей привода, включая рабочий орган машины.

При первом варианте движения привода имеет место следующее условие:

$$T_{6i} \leq T_c + T_i. \quad (4)$$

Неравенства (3) и (4) указывают на взаимно противоположный характер соотношений между активным вращающим моментом  $T_{6i}$  и моментом сопротивления  $T_c$  и  $T_i$ .

Поскольку (см. рис. 2) в процессе буксования предохранительной фрикционной муфты или АФМ вращающий момент  $T_{6i}$  уменьшается, то при втором варианте движения привода машины с течением времени возможно выполнение неравенства (4), т.е. левая часть больше правой. Следовательно, для системы привода машины в данном случае будет характерен первый вариант движения.

При исследовании теплового процесса в предохранительной фрикционной муфте или АФМ это повлечет за собой применение исходной расчетной модели температурного режима муфты.

### Исследование температурных режимов предохранительной фрикционной муфты или АФМ при буксовании

При исследовании известны:

- скорость скольжения пар трения (постоянная для первого варианта движения привода машины);
- предельное давление на контактирующих поверхностях пар трения (выбрано по условию удовлетворения требования износостойкости фрикционных материалов) [9];
- температура активных слоев материалов пар трения (производная от указанных факторов);
- закономерность изменения коэффициента трения фрикционных пар от температуры их нагрева в процессе буксования;
- наибольшая температура нагрева поверхностных слоев контроллера (стального диска) к концу периода буксования.



Рассмотрим нагрев поверхностных слоев дисков трения не выше допустимой температуры для исключения повышенного износа, изменения структуры и твердости материала дисков, задиров, коробления и т.п. [1].

Избыточную температуру на поверхности (стальных дисков) определяли по формуле [9]:

$$v_q = \frac{q}{\lambda} \left( \frac{2\alpha\tau}{\delta} + \frac{\delta}{G} \right), \quad (5)$$

где  $q$  — плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала дисков, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\alpha$  — коэффициент температуропроводности материала дисков, м<sup>2</sup>/с;

$\delta$  — толщина дисков, м;

$\tau$  — время буксования муфты, с;

$G$  — масса муфты, кг.

Плотность теплового потока  $q$  вычисляли по формуле [9]:

$$q = \frac{Q}{\tau \sum F}, \quad (6)$$

где  $Q$  — работа сил трения при буксовании муфты, Дж;

$\sum F$  — площадь трущихся поверхностей всех дисков муфты, м<sup>2</sup>.

Работа сил трения при буксовании муфты [10]:

$$Q = T_c \Phi_{\Sigma},$$

где  $\Phi_{\Sigma}$  — полный (суммарный) угол поворота одной полумуфты относительно другой в течение периода буксования,  $\Phi_{\Sigma} = \omega t$ ;

$\omega$  — угловая относительная скорость при буксовании, с<sup>-1</sup>.

После преобразований найдем:

$$q = \frac{T_c \omega}{\sum F}.$$

Тогда имеем:

$$v_q = \frac{T_c \omega}{\lambda \sum F} \left( \frac{2\alpha\tau}{\delta} + \frac{\delta}{G} \right). \quad (7)$$

Соотношение (7) показывает, что избыточная температура на поверхностях дисков увеличи-

вается пропорционально времени буксования АФМ.

Если в предохранительной фрикционной муфте или АФМ используют фрикционные материалы, коэффициент трения скольжения которых уменьшается с увеличением температуры нагрева поверхностей трения, то момент трения скольжения  $T_c$  муфты с течением времени буксования также уменьшается. Вывод о существовании прямо пропорциональной зависимости параметров  $v_q$  и  $\tau$  справедлив только в случае использования в конструкции предохранительной фрикционной муфты или АФМ фрикционных материалов, у которых практически отсутствует зависимость коэффициента трения от температуры поверхностных слоев трения либо такая зависимость слабая нелинейная.

Результаты исследования показывают, что рациональный температурный режим при буксовании предохранительных фрикционных муфт и АФМ, может быть задан с помощью подбора сочетания материалов пар трения, обеспечивающих гиперболическую закономерность изменения температуры нагрева пар трения в процессе буксования муфты.

Закономерность изменения избыточной температуры на поверхностях трения предохранительной фрикционной муфты носит более сложный характер ввиду существующей гиперболической зависимости коэффициента трения от температуры нагрева.

Результаты исследования могут быть использованы при изучении температурных режимов в процессе буксования предохранительных фрикционных муфт и АФМ в целях ограничения температуры нагрева поверхностей трения в течение заданного периода буксования.

## Выводы

- Наиболее благоприятный тепловой режим работы предохранительной фрикционной муфты или АФМ существует в том случае, когда температурная зависимость коэффициента трения описывается гиперболической зависимостью.

- Основное требование по оптимизации процесса срабатывания предохранительной фрикционной муфты или АФМ с точки зрения



теплового режима при буксовании муфты — номинальный вращающий момент должен быть, по меньшей мере, равен моменту сил трения при буксовании.

3. Два варианта движения привода машины с буксированием предохранительной фрикционной муфты или АФМ имеют различные показатели теплового режима муфты, что дает возможность выбрать и исследовать наименее благоприятный процесс — с полной остановкой ведомых частей привода и муфты.

### Библиографический список

- Поляков В.С., Барбаш И.Д., Ряховский О.А. Справочник по муфтам. Л.: Машиностроение, 1974. 352 с.
- Шишкарев М.П. Адаптивные фрикционные муфты. Исследование, конструкции и расчет. Ростов н/Д: Изд-во РГАСХМ, 2002. 228 с.
- Überlastkupplung für Zahnrämenscheiben // VDI-Z: Integr. Prod. 1998. P. 99—100.

4. Шишкарев М.П., Чан Ван Дык. Исследование адаптивной фрикционной муфты с комбинированной обратной связью // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 9. С. 29—32.

5. Шишкарев М.П. Выбор типа предохранительного устройства привода машины // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. № 12. С. 12—15.

6. Шишкарев М.П. Повышение эффективности защиты приводов машин от перегрузок адаптивными фрикционными муфтами: дис. ... д-ра техн. наук. Ростов н/Д, 2007. 32 с.

7. Шишкарев М.П. Вопросы динамики привода машины с адаптивной фрикционной муфтой // Вестник машиностроения. 2004. № 5. С. 3—8.

8. Шишкарев М.П., Гавриленко М.Д., Фокин А.Е. Динамика процесса срабатывания адаптивной фрикционной муфты с дифференцированными парами трения // Вестник ДГТУ. 2011. № 7 (58). С. 1072—1078.

9. Зельцерман И.М., Каминский Д.М., Онопко А.Д. Фрикционные муфты и тормоза гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1965. 238 с.

10. Кухлинг Х. Справочник по физике: пер с нем. М.: Мир, 1982. 520 с.

◆◆◆————◆◆◆

УДК 621.039.346.53

**К.Х. Махкамов, д-р техн. наук, М.И. Мамасалиева, Г.Ш. Жураева**  
(Ташкентский государственный технический университет им. Абу Райхана Беруни)  
E-mail: mismuqaddas@mail.uz

## Энергетический баланс контактного взаимодействия при изнашивании материалов в потоке твердых абразивных частиц

Описаны энергетические поглощения материалом энергии частицы, когда не происходит разрушение частиц и образование продуктов износа. Приведен баланс удара твердой сферической частицы по поверхности материала.

*Energy absorptions are described by material to energy of the particle, when does not occur the destruction of the particles and forming the products of depreciation. Is also brought balance of the blow of the hard spherical particle on surfaces of the material.*

**Ключевые слова:** износ, поглощение энергии, энергетический баланс, контактное взаимодействие.

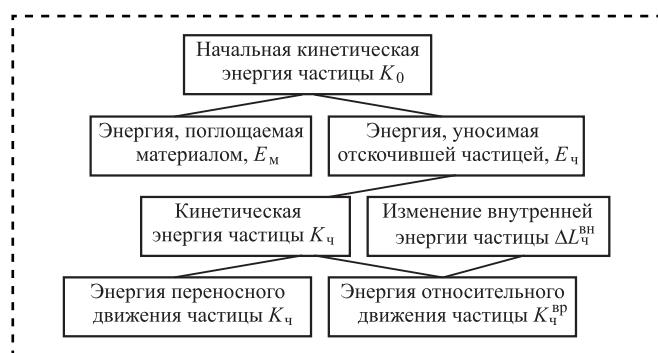
**Keywords:** depreciation, energy absorptions, balance of energy, contact interaction.

Определение составляющих баланса энергии на контакте частицы с материалом позволяет детально исследовать закономерности поглощения материалом энергии частицы, когда не происходит разрушения частиц и образования продуктов износа (рисунок). При этом предполагается, что закономерности поглощения материалом энергии при ударе и износе сохраняются одинаковыми.

Аналитически баланс энергии имеет вид:

$$\delta_m + \delta'_z + \delta_z^{ayl} + \delta_z^{ich} = 1,$$

где  $\delta'_z$  и  $\delta_z^{ayl}$  — относительная энергия переносного и относительного движения частицы;  $\delta_m$  — относительная энергия, поглощаемая материалом образца;  $\delta_z^{ich}$  — относительная энергия, расходуемая на изменение внутренней энергии частицы.



**Схема энергетического баланса удара твердой сферической частицы по поверхности материала**

Относительную энергию, уносимую отскочившей частицей  $\delta_z$ , определяют зависимостью:

$$\delta_z = \delta_z^1 + \delta_z^{ayl} = \left( \frac{v_1}{v_0} \right)^2 + \frac{45}{32} \left( \frac{T \Delta t}{\pi R^3 \rho v_a} \right)^2.$$

Наибольшее количество энергии расходуется на вращение частицы в области углов атаки  $30^\circ \leq \alpha_0 \leq 60^\circ$  — 1,1...15,2 % от потерянной энергии переносного движения. При скользящих углах атаки  $\alpha_0 \leq 15^\circ$  и прямом внедрении потери энергии на вращение в 2...7 раз меньше, чем при средних углах атаки. Относительную энергию, поглощаемую материалом, определяют из предположения, что материал поглощает ту часть энергии частицы, которая расходуется на преодоление сил реакции  $N$  и  $T$ :

$$E_{\Pi} = A = Nh + Tl_a,$$

тогда

$$\delta_m = \frac{Nh + Tl_a}{K_a} = \frac{3}{2} \frac{h(N + T \operatorname{ctg} \alpha_0)}{\pi R^3 \rho v_0^2},$$

где  $R$  — радиус частицы;  $\alpha_0$  — начальный угол атаки частицы;  $h$  — глубина лунки отпечатка;  $\rho$  — плотность частицы.

При изменении углов атаки от 15 до  $90^\circ$  параметр энергетического баланса  $\delta_m$  монотонно возрастает. Однако по мере увеличения  $\alpha_0$  возрастает доля энергии, расходуемой на изменение внутренней энергии частицы. Исследование зависимости составляющих энергетического баланса от размера стальных шариков показало, что  $\delta_m$  возрастает с увеличением диаметра частиц, а доля энергии,

аккумулируемой в виде внутренней энергии частицы  $\delta_z^{ich}$  — уменьшается. Существенного изменения составляющих баланса с увеличением скорости удара  $v_0$  для скользящих углов атаки не обнаружено. Для средних углов атаки и прямого внедрения с увеличением скорости  $v_0$  возрастает доля энергии, поглощаемой материалом. Энергия, поглощенная материалом при контактном взаимодействии с твердой сферической частицей, не определяется однозначно его агрегатной твердостью. Величина этой энергии лучше коррелирует с геометрическими параметрами контакта, например, с глубиной лунки-отпечатка  $h$ .

Зависимость интенсивности изнашивания  $I$  от угла атаки имеет максимум в области углов  $30^\circ \leq \alpha_0 \leq 60^\circ$ . С увеличением твердости материала  $H_m$  и скорости  $v_0$  максимум зависимости  $I = I(\alpha_0)$  смещается в сторону больших углов атаки. Характер зависимости интенсивности изнашивания от скорости, как и для условий изнашивания в потоке кварцевых частиц, подчиняется закону  $I = bv_0^m$ , где показатель степени  $m \approx 2$ .

Для исследованных материалов  $I$  пропорциональна коэффициенту потерь энергии  $\xi$ , и с уменьшением коэффициента потерь энергии интенсивность изнашивания также уменьшается.

Этой закономерности не подчиняется легированная сталь 12Х18Н10Т, для которой  $\xi$  имеет приблизительно такое же значение, как для цинка. Обнаруженное явление объясняется вязко-пластическими и прочностными свойствами стали 12Х18Н10Т (таблица).

С увеличением геометрических параметров контакта — площади лунки  $S_l$  и валика  $S_b$  в осевом сечении, а также глубины лунки  $h$  интенсивность изнашивания для материалов системы Fe—C увеличивается. Площади лунки-отпечатка и валика в осевом сечении монотонно возрастают с увеличением скорости по закону, близкому к параболическому. Аналогично ведет себя и интенсивность изнашивания.

При изменении углов атаки от 15 до  $90^\circ$  с увеличением нормальной  $N$  и тангенциальной  $T$  составляющих реакции материала интенсивность изнашивания в потоке сферических частиц уменьшается. Таким образом, эти параметры характеризуют сопротивление материалов изнашиванию. При скользящих углах

#### Физико-механические свойства исследуемых материалов

Материал	Термообработка	НВ, МПа	$\sigma_b$ , МПа	$Q$ , кДж/м <sup>2</sup>	$\psi$ , %	$\delta$ , %
Цинк ГОСТ 3640—94	В состоянии поставки	410	190	68,6	50	-
Армко-железо ГОСТ 11036—75	Закалка с 1273 К в воду, отпуск 2 ч	1030	370	2940	80	45
Сталь 45 нормализованная ГОСТ 1577—93	Закалка 1073 К-нормализация	1970	610	1078	40	16
Сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5632—72	Закалка 1373 К в воду	2100	500	2450	55	40
Сталь 45 закаленная ГОСТ 1577—93	Закалка 1113 К в воду, отпуск 1,5 ч 473 К	5800	1200	392	16,5	4



атаки как нормальные, так и касательные силы в зоне контакта имеют небольшие значения. Этот факт объясняет малое значение интенсивности изнашивания при скользящем воздействии потока твердых частиц. При средних углах атаки  $\alpha_0 = 30\ldots60^\circ$  развиваются максимальные касательные силы при достаточно высоких нормальных, что является одной из причин наличия максимума в зависимости интенсивности изнашивания от угла атаки для многих конструкционных материалов. При прямом ударе абразивных частиц нормальная составляющая реакции материала достигает своих максимальных значений и обуславливает максимальный уровень нормальных напряжений. В этих условиях износостойкость материалов определяют их способностью воспринимать энергию абразивных частиц не разрушаясь. Такими свойствами в большей степени обладают вязкие материалы.

В области скользящих и средних углов атаки с увеличением коэффициента трения  $f$  величина  $I$  увеличивается. Незначительное (в 1,4 раза) увеличение коэффициента трения при углах атаки  $\alpha_0 = 15^\circ$  и  $\alpha_0 = 45^\circ$  приводит к резкому (в 8,5 раза) росту интенсивности изнашивания. Причем такая зависимость  $I$  от  $f$  сохраняется во всем исследованном диапазоне углов атаки для материалов группы Fe—C. Сопоставление зависимостей  $f = f(\alpha_0)$  и  $I = I(\alpha_0)$  позволяет утверждать, что они имеют качественно одинаковое поведение. Углы атаки, при которых интенсивность изнашивания и коэффициент трения имеют максимальные значения, приблизительно совпадают, а увеличение твердости материала или скорости приводит к тому, что максимум зависимостей  $f = f(\alpha_0)$  и  $I = I(\alpha_0)$  смещается в область больших углов атаки. Чем меньше твердость материала, тем выше коэффициент трения, тем больше износ в потоке твердых частиц.

Один из наиболее важных параметров контактного взаимодействия — энергия, поглощаемая материалом  $E_m$  при ударе твердой частицы. Для скользящих углов атаки  $\alpha_0 = 15^\circ$  величина  $I$  удовлетворительно коррелирует с  $E_m$ . С увеличением энергии  $E_m$  примерно в 2 раза интенсивность изнашивания увеличивается в 12 раз. При углах атаки  $\alpha_0 > 40^\circ$  характер зависимости  $I = I(E_m)$  не

меняется. Однако установленной закономерности не подчиняется цинк и сталь 12Х18Н10Т. По-видимому, взаимосвязь между интенсивностью изнашивания и энергетическими параметрами справедлива для определенной группы материалов. Значение  $E_m$  монотонно возрастает с увеличением угла атаки при любой твердости материала. Аналогично изменяется интенсивность изнашивания для твердых материалов. Для пластичных материалов такая пропорциональность наблюдается до  $\alpha_0 = \alpha_i$  ( $\alpha_i$  — угол минимального износа). С увеличением твердости интенсивность изнашивания и энергия, поглощаемая материалом, для скользящих углов атаки уменьшаются. Для других углов атаки корреляции между  $I$  и  $E_m$  не установлено.

### Заключение

При скользящем воздействии потока твердых частиц ( $\alpha_0 < 30^\circ$ ) для изготовления деталей и узлов необходимо использовать материалы, которые мало склонны к поглощению энергии частиц. Для материалов этого класса (закаленные стали, металлокерамические и спеченные материалы) в условиях воздействия твердых частиц характерны низкие значения коэффициента потерь энергии, трения и геометрических параметров лунок-отпечатков.

При прямом воздействии потока твердых частиц ( $\alpha_0 > 75^\circ$ ) рекомендуется применять конструкционные материалы, которые при умеренном поглощении энергии частиц имеют высокие прочностные характеристики, меньшие геометрические и силовые параметры контакта.

При средних углах атаки ( $30^\circ \leq \alpha_0 \leq 75^\circ$ ) материалы должны обладать таким сочетанием механических свойств и параметров контактного взаимодействия, которые характерны для первых двух групп. При незначительном уровне внешних динамических нагрузок предпочтение следует отдавать материалам первой группы.

### Библиографический список

1. Махкамов К.Х., Алибоев Б.А. Ударно-гидроабразивное изнашивание. Т.: "Fan va texnologiya", 2012. 112 с.
2. Червяков И.Б., Назаров С.И. Энергетический баланс контактного взаимодействия твердой сферической частицы с поверхностью материала // Трение и износ. 1982. № 5. С. 903—909.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2

Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

Адрес электронной почты издательства: [mashpubl@mashin.ru](mailto:mashpubl@mashin.ru);

редакции журнала: [sborka@mashin.ru](mailto:sborka@mashin.ru), <http://www.mashin.ru>.

Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 268-48-97.

Технический редактор Патрушева Е.М. Корректор Сажина Л.И.

Сдано в набор 06.04.2017. Подписано в печать 30.05.2017. 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](http://www.aov.ru)

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.