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 / **7 (203)**

СОДЕРЖАНИЕ

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Королев А.В., **Балаев А.Ф.**, **Яковишин А.С.** Обеспечение качества подшипников качения на основе применения технологии многоциклового нагружения 291

Соединение деталей машин

Гошко А.И. Мониторинг требований к точности уплотнений разъемных герметичных соединений систем безопасности контайнмента реактора 294

Экология и безопасность сборочных работ

Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И. Сборка установки очистки воздуха 302

Трение и смазка в машинах и механизмах

Королёв П.В., Шилов М.А., Королева С.В., Королев В.В. Модель прогнозирования физико-механических параметров нанокомпозиционных материалов в условиях трибоконтакта 308

Полетаев В.А., Шпенькова Е.В., **Голяс А.А.** Исследование механических характеристик поверхностного слоя деталей электронасосов, упрочненных алмазным выглаживанием 311

Хопин П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в условиях вакуума на основе термокорреляционных зависимостей 317

Шмидт А.А., Володин И.М. Подбор смазки с учетом коэффициента трения для вытяжки деталей из высокопрочной стали 321

В помощь конструктору, технологу

Денисенко А.Ф., Назаров Н.С. Формирование регрессионной модели контактного термического сопротивления плоских соединений шпиндельных узлов 325

Житников Ю.З., Пискунов В.В. Обоснование погрешностей относительного смещения осей соединяемых деталей при роботизированной сборке . . 330

Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В. Прочность металлокомпозитных узлов при магнитно-импульсной сборке 333

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

Тел.: 8 (499) 269-54-98

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

Ю.Н. КУЛЬЧИН, д.т.н., чл.-кор. РАН
А.А. СУПОНЯ, 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. ХИСАМУТДИНОВ, 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.

ОРЕНБУРГ

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

ПЕРМЬ

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

РОСТОВ-НА-ДОНУ

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

РЫБИНСК

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

САМАРА

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.

ТОМСК

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

ТУЛА

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

ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

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

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ

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

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2017

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 **7 (203)**

CONTENTS

Quality assurance. Testing. Monitoring

Korolev A.V., Balaev A.F., Yakovishin A.S. Quality assurance of rolling bearings based on the use of high-cycle loading technology 291

Connection of mashines parts

Goshko A.I. Monitoring of requirements for precision of seals detachable sealing compounds of the reactor containment safety systems 294

Ecology and safety in assembly

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S, Boichuk M.I. Assembly of air cleaning system 302

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Korolyov P.V., Shilov M.A., Koroleva S.V., Korolev V.V. Model of forecasting of physical and mechanical properties of nanocomposite materials in a tribocontact 308

Poletaev V.A., Shpen'kova E.V., Golias A.A. Investigation of mechanical characteristics of surface layer of pumps parts hardened by diamond smoothing 311

Khopin P.N. An assessment of operability of friction couples with solid lubricating coatings in vacuum conditions on the basis of thermocorrelation dependences 317

Schmidt A.A., Volodin I.M. Choosing of lubricants based on friction coefficient for stamping of parts from AHSS 321

Industrial and design engineer's aid

Denisenko A.F., Nazarov N.S. Formation of regression model of contact thermal resistance of flat connector of spindle assemblies 325

Zhitnikov Yu.Z., Piskunov V.V. Substantiation of errors in the relative displacement of the axes of the parts in robotic assembly 330

Samohvalov V.N., Samohvalova Zh.V. Strength of the composite-metal compounds in magnetic-pulse assemblage 333

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Pressa Rossii" — **84967**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: 8 (499) 269-54-98
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. VASIL'EV (Chief editor)
V.V. BARDUSHKIN
I.A. BUYANOVSKY
M.V. VARTANOV
A.A. GUSEV
S.M. ZAKHAROV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
A.V. IGNATOV
Yu.G. KOZYREV
A.I. KUMENKO
I.A. LUBININ
E.A. MIKRIN
B.V. SHANDROV
A.G. KHOLODKOVA

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

VOLGOGRAD
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. NUZHDINA, I.M. GLIKMAN

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

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2017

УДК 621.77.016.3

А.В. Королев, *д-р техн. наук,* **А.Ф. Балаев,** *канд. техн. наук,* **А.С. Яковишин**
(Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.)
E-mail: bandrey.sc@gmail.com

Обеспечение качества подшипников качения на основе применения технологии многоциклового нагружения

Описан технологический способ релаксации остаточных напряжений колец подшипников на основе использования многоциклового нагружения. Представлены результаты экспериментальных исследований, доказывающие зависимость остаточных напряжений от технологических факторов: угла скрещивания валков, определяющего скорость подачи, и технологической деформации.

The technological way of relaxation of residual stress of bearing rings through the use of high-cycle loading is described. The results of experimental studies showing the dependence of the residual stress on technological factors: the angle of the crossing rolls defining the feed rate, and the technological deformation are presented.

Ключевые слова: кольцо подшипника, остаточные напряжения, деформация, релаксация напряжений, технология.

Keywords: bearing rings, residual stresses, deformation, stress relaxation, technology.

Введение

Подшипники качения широко применяют в различных видах техники — от гражданской до аэрокосмической. Подшипниковые узлы — наиболее ответственные, во многом определяющие долговечность и безотказность техники. Даже небольшие отклонения геометрических или физико-механических параметров, характеризующих качество подшипников, в процессе эксплуатации способны в разы сократить срок службы механизмов и даже привести к отказу. Поэтому к обеспечению требуемых показателей качества подшипников предъявляют высокие требования. Однако в результате релаксации остаточных напряжений, накопленных после различных технологических операций изготовления подшипников, происходит отклонение фактических параметров качества от требуемых и эксплуатационных нагрузок с течением времени. Релаксация остаточных напряжений сопровождается изменением геометрической формы, что приводит к изменению натяга подшипников в собранном узле, площади контакта, перераспределению контактных напряжений. Под влиянием этих факторов происходит перенаклеп, возникают структурные изменения, появляются микротрещины, которые могут привести к разрушению подшипника. Наименее жесткие элементы подшипников, и соответственно наиболее подверженные деформированию под действием остаточных напряжений, — кольца.

Для снижения негативного влияния остаточных напряжений на кольца подшипников перед завершающими технологический процесс операциями их подвергают стабилизации нагревом и медленным охлаждением. Термические методы стабилизации, обладая низкой производительностью и относительно высоким энергопотреблением, не позволяют полностью снимать остаточные напряжения, что служит основанием для поиска, разработки и развития новых технологических подходов по снятию остаточных напряжений. Перспективное направление развития технологии стабилизации геометрических и физико-механических показателей качества металлических изделий, в том числе колец подшипников, — разработка методов на основе цикломеханического нагружения изделий [1—2]. Данный подход имитирует действие

эксплуатационных циклических нагрузок в существенно ускоренном варианте, благодаря подбору оптимальных технологических режимов. Методика выбора оптимальных технологических режимов цикломеханической стабилизирующей обработки зависит от вида и параметров изделия, представляя собой комплексную технологическую задачу. Для решения данной задачи применительно к кольцам подшипников разработан новый технологический способ стабилизации геометрических параметров на основе многоциклового нагружения [3].

Способ многоцикловой стабилизации колец

Технология стабилизации геометрических параметров колец подшипников на основе многоциклового нагружения заключается в многократном периодическом повторении цикла нагрузки-разгрузки изделия. В целях реализации данной технологии разработаны математическая модель для расчета рациональных технологических режимов обработки и конструкция устройства для осуществления многоцикловой обработки колец [3, 4].

В устройстве для релаксации остаточных напряжений кольцевых деталей базирование обрабатываемых колец осуществляется по цилиндрическим поверхностям валков с равными диаметрами и скрещенными под углом 2α осями вращения. Перекрещенные оси валков обеспечивают продольное равномерное перемещение колец. При взаимно противоположном развороте опорных валков на равный по величине угол α вдоль вертикальной плоскости траектория движения геометрического центра кольца отклоняется от прямолинейной. Кинематика бесцентровой обкатки цилиндрических изделий при цикломеханической стабилизации аналогична кинематике бесцентрового суперфиниширования. Кривизна траектории движения центра кольца тем больше, чем больше угол разворота валков 2α [5].

После установки кольца между валками радиальная нагрузка не меняется на протяжении всего цикла обработки, состоящего из множества циклов обкатки детали.

Многократная обкатка деталей ведет к накоплению внутренней энергии в зонах остаточных напряжений, при достижении критического значения которой в этих зонах начинаются пластические сдвиги микрозерен материала, сопровождаемые релаксацией остаточных напряжений. При этом недостаточная для пластического течения самих зерен скорость накопления энергии не успевает вызывать изменение формы и размеров обрабатываемого кольца. Радиальная нагрузка P, создаваемая третьим валком, прикладывается к кольцу в месте, равноудаленном от мест контакта кольца с базирующими валками. Один из базирующих валков сообщает вращательное движение кольцу, в результате чего происходит равномерное упругое деформирование материала вдоль всей окружности кольца на величину технологической деформации Δ.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Для оценки влияния технологических факторов на показатели качества процесса релаксации остаточных напряжений и стабилизации геометрических параметров применен метод полного факторного эксперимента. В качестве трех независимых технологических факторов выбраны: деформация стабилизируемой детали Δ, обусловленная радиальной нагрузкой, прикладываемой рабочим валком к обрабатываемому кольцу; частота вращения ведущего валка n; угол взаимного разворота валков в вертикальной плоскости α, обусловливающий продольную подачу деталей и продолжительность цикла обработки. В качестве экспериментальных образцов, подвергаемых многоцикловому нагружению, отобрано 24 наружных кольца подшипника Ш20.01 (ГОСТ 3635—78) с наружным диаметром $D = 35$ мм, внутренним диаметром $d = 20$ мм и высотой $C = 12$ мм. Кольца подшипников изготовлены из стали ШХ15 и прошли все технологические операции, предшествующие стабилизации.

Измерение остаточных напряжений проводили по деформации колец после разреза и рассчитывали по формуле:

$$\sigma_o = \frac{2\delta EJ}{\pi r^2 W}, \qquad (1)$$

где E — модуль упругости материала образца, $E = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа;

J — момент инерции сечения образца;

W — момент сопротивления изгибу сечения кольца;

r — радиус нейтрального слоя кольца;

δ — деформация кольца в поперечном сечении, перпендикулярном линии разреза кольца вдоль образующей.

Для оценки отклонения остаточных напряжений от среднего значения вычисляли дисперсию воспроизводимости по данным параллельных наблюдений плана матрицы планирования в каждой точке плана эксперимента. Проверку гипотезы однородности дисперсии проводили по кри-

терию Кохрена для уровня значимости, равного 5 %. При условии однородности дисперсий опытов определяли дисперсию воспроизводимости.

Получена линейная регрессионная зависимость остаточных напряжений от технологической деформации Δ и угла разворота валков α:

$$\sigma_o = 5,43 - 290\Delta + 10,51\alpha. \quad (2)$$

Частота вращения ведущего валка *n* в регрессионной модели (2) не учтена, поскольку не оказывает существенного влияния на остаточную деформацию, коэффициент при которой принимает значение меньше 1.

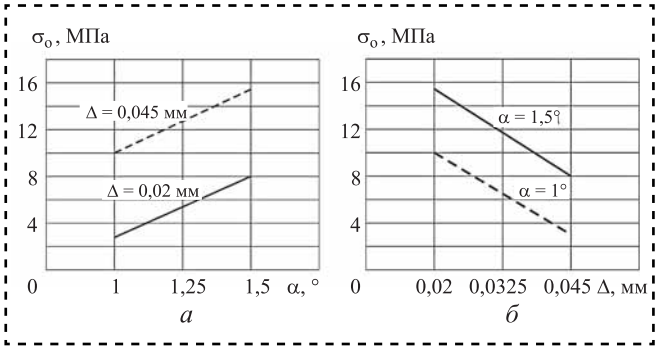
После нахождения дисперсии результатов вычисления значений параметра оптимизации для каждой точки плана эксперимента адекватность модели проверяли по критерию Фишера.

По полученной регрессионной модели (2) построены графики зависимостей остаточного напряжения от угла перекрещивания валков и от технологической деформации кольца (рисунок).

Увеличение угла перекрещивания валков ведет к увеличению остаточных напряжений. Это может быть связано с тем, что увеличение угла разворота валков приводит к увеличению радиуса кривизны траектории движения. Таким образом, действие первоначально настроенной величины технологической деформации будет приходиться на меньшую часть общей траектории движения.

С увеличением начальной технологической деформации остаточные напряжения уменьшаются. Снимаемое остаточное напряжение напрямую зависит от общей работы технологической деформации при многоцикловой обработке, определяемой как максимальной величиной технологической деформации, так и продолжительностью ее действия на изделие.

Частота воздействия технологической деформации в выбранных диапазонах варьирования



Зависимость остаточных напряжений:
а — от угла перекрещивания валков; *б* — от технологической деформации

технологических факторов, ограниченных верхним и нижним уровнями варьирования, практически не оказывает влияния на снятие остаточных напряжений.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить связь между технологическими факторами стабилизирующей обработки и величиной остаточных напряжений. На основе полученных по результатам эксперимента графиков и эмпирической зависимости можно сделать следующие выводы:

- увеличение угла перекрещивания опорных валков ведет к увеличению остаточных напряжений;
- увеличение начальной технологической деформации ведет к снижению остаточных напряжений;
- снимаемое остаточное напряжение напрямую зависит от общей работы технологической деформации при цикломеханической обработке, определяемой максимальной технологической деформацией и продолжительностью ее действия на изделие;
- частота вращения колец практически не оказывает влияния на изменение остаточных напряжений.

Таким образом, технология стабилизации геометрических параметров качества колец подшипников на основе многоциклового нагружения может быть рекомендована в качестве альтернативы более энергоемкой и менее производительной технологии температурного отпуска.

Библиографический список

1. **Семенов В.М., Деньщиков А.Ю., Подлесный С.В.** Снижение остаточных напряжений в элементах конструкций методом вибрационной обработки. Краматорск: ДГМА, 2012. 136 с.

2. **Дрыга А.И.** Вибростабилизирующая обработка сварных и литых деталей в машиностроении. Теория, исследования, технология. Краматорск: ДГМА, 2004. 157 с.

3. **Королев А.В., Королев А.А., Балаев А.Ф., Яковишин А.С.** Способ обработки кольцевой детали непрерывной обкаткой тремя валками: патент RU 2583520 C1 от 10.05.2016. № 134.

4. **Modeling** the mechanism of stress relaxation of ring parts at high-cycle loading / A.F. Balaev et al. // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. 2015. P. 1—4.

5. **Захаров О.В., Бржозовский Б.М., Балаев А.Ф.** Наладка бесцентрового суперфинишного станка на обработку поверхности со сложной образующей // СТИН. 2006. № 4. С. 12—16.

УДК 621.8

А.И. Гошко, *канд. техн. наук (Всемирная ассоциация организаций, эксплуатирующих атомные электростанции, Москва)*
E-mail: pv106@yandex.ru

Мониторинг требований к точности уплотнений разъемных герметичных соединений систем безопасности контайнмента реактора

Отражены вопросы мониторинга современных требований к основным представителям разъемных герметичных соединений роторного оборудования, трубопроводов и трубопроводной арматуры систем безопасности.

Мониторинг требований к точности уплотнений разъемных герметичных соединений по функциональным параметрам материала и функциональным геометрическим параметрам проводится в рамках риск-ориентированного подхода к управлению герметичностью систем безопасности контайнмента реактора. По результатам мониторинга формируется карта отказов соединений. Рассмотрены подвижные и неподвижные соединения роторного оборудования, трубопроводов и трубопроводной арматуры, дан анализ точности параметров материалов и геометрии уплотнений соединений.

Reflect the issues of monitoring the current requirements of major detachable sealed connection representatives of rotary equipment, piping and valves safety systems.

Monitoring requirements for precision seals detachable sealed connections functional parameters of material and geometrical parameters is carried out within the framework of the risk-informed approach to managing the integrity of safety systems of reactor containment. Based on the results of monitoring generates map bounce connections. Considered mobile and motionless rotary connection equipment, piping and valves, the analysis accuracy parameters of materials and geometry of the sealing compounds.

Ключевые слова: контайнмент, системы безопасности, разъемные герметичные соединения, требования к точности уплотнений.

Keywords: containment, safety systems, detachable sealed the connection, requirements for accuracy.

Разработка требований к точности уплотнений разъемных герметичных соединений (РГС) при реализации риск-ориентированного подхода к управлению герметичностью элементов систем безопасности связана с [1]:

— мониторингом современных требований к уплотнениям РГС по их функциональным параметрам: материала (ФПМ) и геометрическим (ФГП), и формированием карты отказов систем безопасности по РГС;

— проведением опытно-промышленных исследований герметизирующей способности РГС по ФПМ и ФГП в целях формирования уравнений связи [2, 3];

— формулированием систем норм и допусков на ФПМ и ФГП с учетом общих положений [4, 5] и их внедрением в виде обобщающего нормативного документа на РГС систем безопасности контайнмента реактора.

Функциональные параметры уплотнений и деталей РГС

Функциональные геометрические параметры. При анализе геометрических параметров деталей РГС различают номинальные (идеальные, не имеющие отклонений формы и размеров) поверхности, форма которых задана чертежом, и реальные (действительные) поверхности, ограничивающие тело и отделяющие его от окружающей среды. У деталей реальные поверхности получаются в результате формообразования при

изготовлении и видоизменяются при эксплуатации арматуры. Аналогично следует различать номинальный и реальный профиль, номинальное и реальное расположение поверхности (или профиля). Вследствие многочисленных технологических, конструктивных, силовых и других факторов образуются отклонения действительной формы от номинальной. Это приводит к тому, что размеры в различных сечениях детали отличаются друг от друга. Реальные поверхности всегда волнисты и шероховаты.

Отклонения геометрических параметров принято классифицировать укрупнено:

— отклонения собственного размера ΔD и угла $\Delta\alpha$ относят к отклонениям нулевого порядка Δ_0 (например, для клиновых задвижек (рис. 1));

— отклонения расположения поверхностей и осей — 1-го порядка Δ_1;

— отклонения формы поверхности (неплоскостности, некруглости) — 2-го порядка Δ_2;

— отклонения, имеющие характер волнистости, — 3-го порядка Δ_3;

— шероховатость поверхности — 4-го порядка Δ_4 (например, для всех уплотнений РГС (рис. 2)).

Перечень геометрических параметров и их предельные значения устанавливают в технической документации на РГС элементов. Рекомендуемый перечень подлежащих нормированию ФГП отдельных элементов приведен в табл. 1.

Функциональные параметры материалов. Основные требования к ФПМ для материалов уплотнений и деталей РГС: износостойкость, коррозионная и эрозионная стойкость, малый коэффициент трения и отсутствие схватывания (задирания) поверхностей. Детали РГС тепломеханического оборудования, трубопроводов и арматуры изготавливают из углеродистых, легированных и коррозионно-стойких сталей, их уплотнения — из сплавов повышенной стойкости и неметаллических конструкционных материалов. С повышением требований, предъявляемых

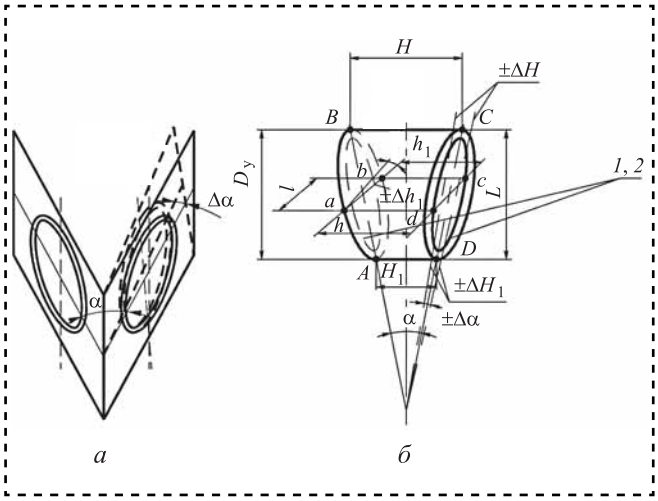


Рис. 1. Формирование клинового соединения затвора клиновой задвижки:

а — расположение в полуплоскостях двугранного угла функциональных уплотнительных поверхностей и формирование погрешностей угловых размеров; *б* — клин и его функциональные линейно-угловые параметры уплотнительных поверхностей (*1* и *2*)

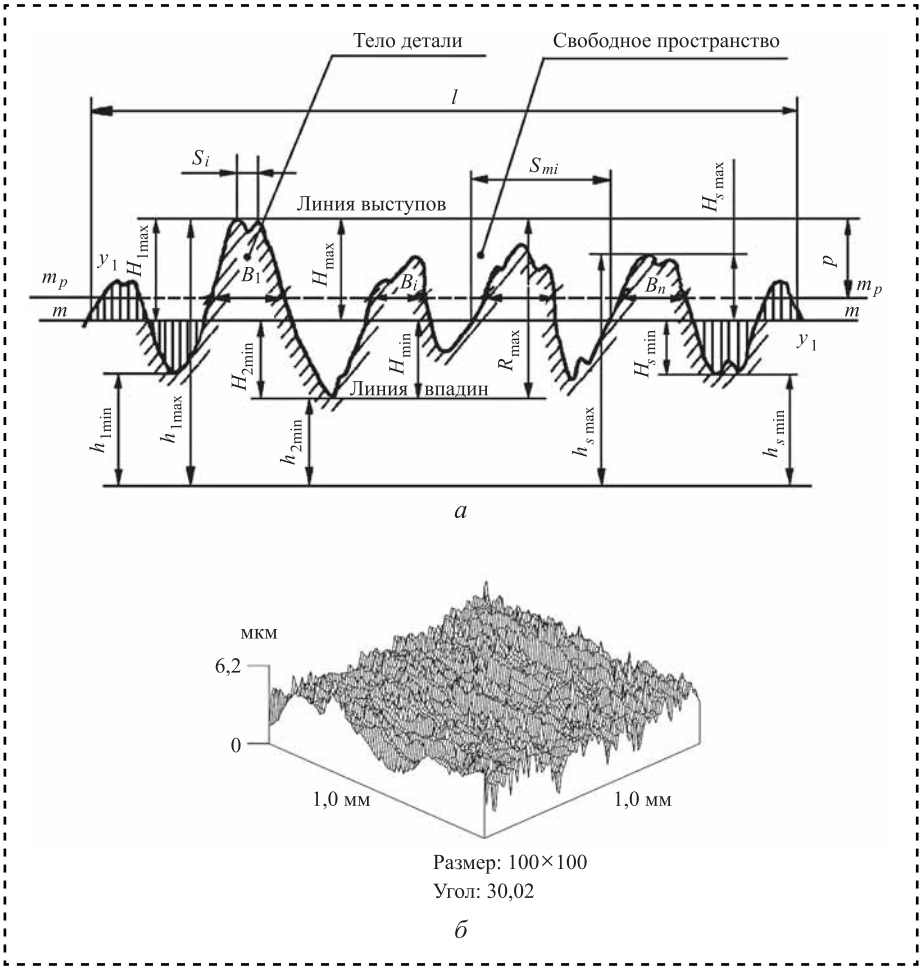


Рис. 2. Форма шероховатости уплотнительной поверхности детали РГС при двух- (*а*) и трехмерном (*б*) измерениях

Таблица 1

Перечень подлежащих нормированию ФГП уплотнений РГС элементов систем безопасности

Группа геометрических параметров	Насосы, вентиляторы, компрессоры — уплотнение валов	Сальники насосов и арматуры	Трубопроводы и арматура фланцевые	Арматура — затворы клиновых задвижек
Отклонения размеров	Отклонение диаметров вала, колец, камеры	Отклонение диаметров вала (штока, шпинделя), камеры	Отклонение размеров и углов уплотнений фланцев и прокладки	Отклонение угла между уплотнениями клина, корпуса
Отклонения расположения	Отклонение от соосности (эксцентриситет) и перекос (угловое смещение) осей вала, колец и камеры	Отклонение от соосности (эксцентриситет) и перекос (угловое смещение) осей вала и камеры	Отклонение от соосности (эксцентриситет) и перекос (угловое смещение) осей уплотнений фланцев	Перекос (угловое смещение) осей уплотнений клина и корпуса
Отклонения формы	Отклонение от цилиндричности вала и камеры, отклонение от плоскостности колец	Отклонение от цилиндричности вала и камеры	Отклонение от плоскостности (неплоскостность) уплотнений фланцев и прокладки, некруглость уплотнений фланцев	Отклонение от плоскостности (неплоскостность) уплотнений клина и корпуса
Волнистость	Высотные и шаговые параметры вала, колец и камеры	Высотные и шаговые параметры вала и камеры	Высотные и шаговые параметры уплотнений фланцев и прокладки	Высотные и шаговые параметры уплотнений клина и корпуса
Шероховатость	Высотные, шаговые и опорные параметры вала, колец и камеры	Высотные, шаговые и опорные параметры вала и камеры	Высотные, шаговые и опорные параметры уплотнений фланцев и прокладки	Высотные, шаговые и опорные параметры уплотнений клина и корпуса

к элементам РГС, разрабатывают и используют новые материалы, в том числе и для деталей уплотнений. При формировании требований следует учитывать определяющие параметры их состояния (рис. 3 и 4, табл. 2).

Для подвижных РГС валов роторного оборудования торцевого и сальникового типов характерны изменения механических свойств и размеров неметаллических уплотнений, изменение структуры и состояния уплотнительной поверхности вала.

Для подвижных РГС сальников арматуры одна из главных причин нарушения герметичности — коррозия шпинделя (штока). В зоне сальниковой камеры имеет место электролитическая коррозия, протекающая достаточно быстро. Для исключения электролитической коррозии необходимо подбирать такие сочетания материалов шпинделя и крышки сальника, которые имели бы минимальную разность потенциалов. Для повышения коррозионной стойкости поверхности шпинделей их подвергают азотированию

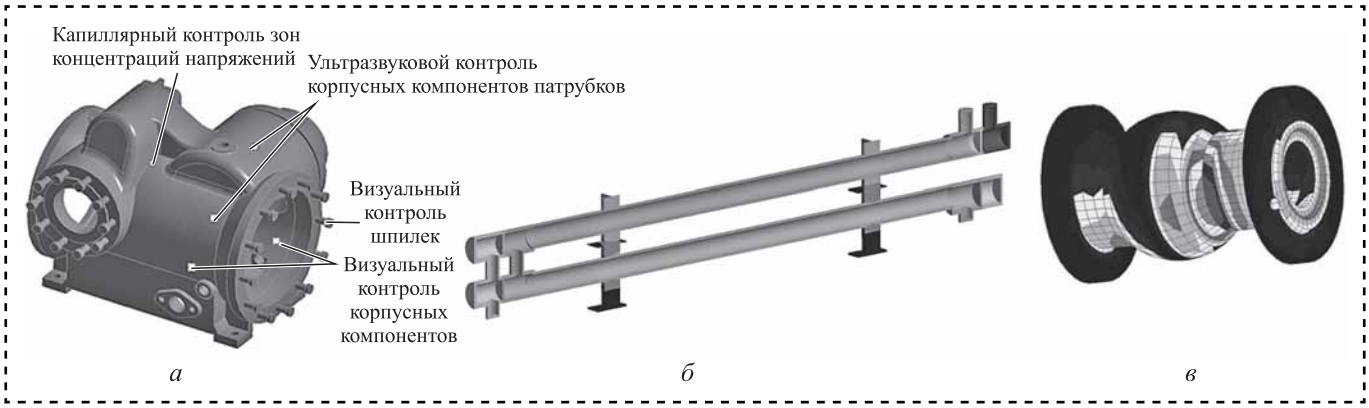


Рис. 3. Фиксация изменений механических свойств и структуры материала корпусов насосов (*а*), теплообменников (*б*) и арматуры (*в*)

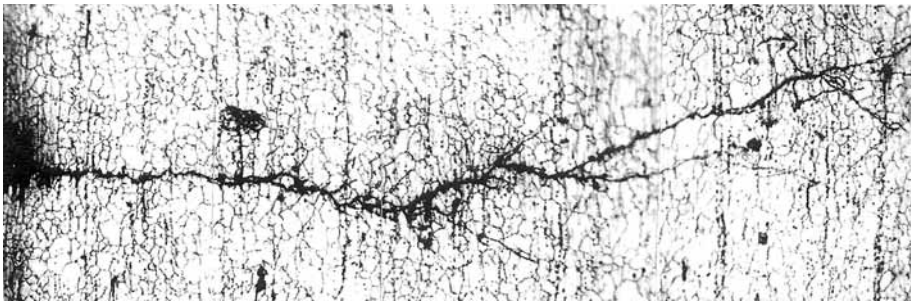


Рис. 4. Формирование межкристаллитного коррозионного растрескивания

или химическому никелированию и полируют, наплавляют стеллитом.

Для подвижных РГС затворов арматуры изменения механических свойств и состояния уплотнений связаны с тем, что углеродистые стали имеют низкую коррозионную стойкость, коррозионностойкие аустенитные стали легко задираются, сплавы повышенной стойкости менее склонны к задиранию, но требуют специальных технологий по наплавке уплотнительных поверхностей. Уплотнения деталей затвора арматуры из углеродистой, легированной и коррозионно-стойкой стали наплавляют коррозионно-стойкой сталью, а работающие в условиях возможной эрозии уплотнений — сплавами повышенной стойкости.

Таблица 2

Определяющие параметры состояния металла элементов

Параметры	Контролируемый дефект старения металла
Предел прочности Предел текучести Относительное удлинение Относительное сужение Твердость *KC*V (ударная вязкость)	Изменение механических свойств
Фазовый состав Зерно Микропоры	Изменение структуры, размеров по указанным параметрам
Трещины: протяженность глубина раскрытие ориентация в пространстве	Растрескивание
Эрозия: площадь повреждения, толщина стенки число повреждений	Локальное утонение
Питтинг: число повреждений на единицу площади глубина повреждений	Повреждения характерные

У неподвижных РГС трубопроводов и арматуры особая роль в обеспечении и сохранении герметичности при эксплуатации отводится как конструкциям фланцевых соединений и их прокладок, так и изменениям механических свойств их материалов. Герметичность соединения при давлении рабочей среды более 1,6 МПа, как правило, может быть обеспечена только при защищенной конструкции фланцевого соединения при использовании металлических закрытых, волнистых, спирально-навитых и других комбинированных прокладок.

Перечень подлежащих нормированию ФПМ деталей уплотнений РГС элементов (табл. 3): $\sigma_в$ — предел прочности при растяжении; $\sigma_и$ — предел прочности при изгибе; $\sigma_т$ — предел текучести; $\sigma_с$ — предел прочности при сжатии; $\tau_{ср}$ — предел прочности при срезе; ψ — поперечное сужение; δ — относительное удлинение; *KC*V — ударная вязкость; НВ — твердость по Бринеллю.

Мониторинг отказов элементов

Мониторинг отказов элементов систем безопасности контайнмента реактора рассматривает:

— общие данные по отказам РГС;

— отказы, связанные с ФПМ уплотнений РГС;

— отказы, связанные с ФГП, формируемыми при обработке уплотнений РГС.

Мониторинг отказов и точность торцевых уплотнений. Повреждение торцевого уплотнения — распространенная причина простоя, например, насоса (рис. 5 на стр. 2 обложки). Состояние уплотнения вала зависит от различных факторов и условий эксплуатации. Иногда при работе насоса условия эксплуатации изменяются и

Таблица 3

Перечень подлежащих нормированию ФПМ уплотнений РГС элементов систем безопасности

Группа параметров материала	Детали насосов, вентиляторов, компрессоров	Детали сальника	Детали фланцевого соединения	Детали затвора
Механические свойства	$\sigma_т$, $\sigma_в$, δ, ψ, *KC*V — для вала, колец и камеры; ограничения по рабочему давлению и температуре для колец	$\sigma_т$, $\sigma_в$, δ, ψ, *KC*V — для вала, шпинделя, штока, сальниковой камеры; ограничения по рабочему давлению и температуре для сальниковой набивки	$\sigma_т$, $\sigma_в$, δ, ψ, *KC*V — для фланцев, болтов, шпилек, гаек, металлических прокладок; $\sigma_в$, $\sigma_с$, $\sigma_и$, $\tau_{ср}$, δ — для неметаллических и комбинированных прокладок	$\sigma_т$, $\sigma_в$, δ, ψ, *KC*V — для пробки, шибера, клина, металлических седел; $\sigma_в$, $\sigma_с$, $\sigma_и$, $\tau_{ср}$, δ — для неметаллических седел
Твердость	HB — для уплотнительных поверхностей вала, колец и камеры	HB — для уплотнительных поверхностей шпинделя, штока	HB — для уплотнительных поверхностей фланцев и металлических прокладок, шпилек, болтов и гаек	HB — для уплотнительных поверхностей пробки, шибера, клина, металлических седел

становятся отличными от тех, на которые были рассчитаны насос и, соответственно, уплотнение вала.

Повреждения, связанные с ФПМ и ФГП уплотнения вала, определяет распределение давления в смазывающей пленке, включающего гидростатическую и гидродинамическую составляющие. Гидростатическая составляющая возникает из-за разности давлений на стороне перекачиваемой жидкости и атмосферы. Гидродинамическое давление возникает при работе насоса из-за скольжения поверхностей.

По функциональным параметрам перечень материалов, которые используют для колец торцевых уплотнений, ограничен. Для поддержания утечки на допустимом уровне зазор в уплотнении должен быть минимальным. В результате смазывающая пленка будет достаточной толщины и материалы поверхности уплотнения выдержат взаимное трение при высокой нагрузке и скорости. Материалы для поверхностей уплотнения с низким коэффициентом трения, высокой твердостью, хорошей устойчивостью к коррозии и высокой теплопроводностью: угольный графит, пропитанный угольный графит, оксид алюминия, карбид вольфрама, карбид кремния, алмазные покрытия и др. [6].

Для минимизации утечки поверхности торцевого уплотнения обрабатывают в соответствующих допусках на шероховатость и плоскостность. Между поверхностями уплотнения, вращающимися относительно друг друга, не должно образовываться гидродинамическое давление.

Шероховатость уплотнений. Трение и износ определяются площадью и рельефом контактных поверхностей. Параметр шероховатости *Ra* характеризует среднее значение высотных параметров, но не форму рельефа (для контактных поверхностей рекомендуются $Ra \leqslant 0{,}15$ мкм). Описывая трение, износ и смазку (трибологические характеристики) поверхностей, лучше использовать кривую "опорной поверхности".

Неплоскостность уплотнений. Обычно плоские поверхности уплотнений обрабатывают шлифованием и притиркой, но имеет место остаточная неплоскостность. Некоторое отклонение формы при относительном вращении может создавать гидродинамическое давление. Это давление увеличивает толщину смазочной пленки, что приводит к увеличению утечки. Согласно концепции механизма работы торцевого уплотнения, основанной на предположении гидродинамического истечения жидкости через трущийся стык, отклонения от исходной плоскостности колец трения ограничиваются 0,6...0,9 мкм [3]. Притирка рабочих поверхностей колец трения осуществляется по общепринятой технологии, и торцевые уплотнения достаточно длительное время работают с утечкой менее 0,015 см^3/мин и низким значением коэффициента трения.

Мониторинг отказов и точность манжетных уплотнений. Повреждение манжетного уплотнения — распространенная причина простоя насосов, вентиляторов — 39 % (рис. 6 на стр. 2 обложки). Состояние данного уплотнения вала зависит от различных факторов и условий эксплуатации.

К причинам утечки относят: неправильный материал манжет; некачественную обработку вала в зоне рабочей кромки; недостаточный натяг статической части и несоответствие допусков

посадки уплотнения и корпуса; непредусмотренную эксплуатацию [7].

Важнейшая функциональная часть манжеты уплотнения — уплотняющая кромка находится в непосредственном контакте с поверхностью вращающегося вала.

Функциональные параметры материалов:

нитрил-бутадиен-эластомер — широко применяют в роторном оборудовании (гидронасосы и др.);

фторэластомер — используют при требованиях высокой химической и термической стойкости;

политетрафторэтилен — не эластичный, роговидный материал применяют в агрессивных средах и при сухом ходе.

Твердость поверхности вала более 45 HRC. При загрязнении среды, внешнем загрязнении или окружных скоростях более 12 м/с — твердость поверхности 60 HRC; глубина закалки более 0,3 мм.

Правильная обработка вала и посадочного отверстия корпуса необходима для успешной работы системы уплотнения. Для вала врезное шлифование после полной обработки поверхности шлифовальным кругом обеспечивает требуемое отсутствие спиральной структуры на валу.

Шероховатость уплотнений: для вала: Rz = = 1,0...5,0 мкм, Ra = 0,2...0,8 мкм и Rmax ⩽ 6,3 мкм. При слишком малой высоте микронеровностей профиля (особенно при высоких окружных скоростях) возникает опасность перебоев в подаче смазки в область уплотняющей кромки, в результате чего происходит затвердевание и образование трещин, вплоть до выгорания частей уплотняющей кромки. Для посадочных отверстий корпуса допустимые параметры шероховатости: Rmax < 16...25 мкм; Ra = 0,8...6,3 мкм; Rz = 6,3...25 мкм.

Некруглость уплотнений вала по IT8.

Мониторинг отказов и точность клиновых затворов. Повреждение уплотнений затвора клиновых задвижек — распространенная причина простоя трубопроводов — 19 %, а в совокупности с другими видами и типами арматуры составляют почти треть — 29 % (рис. 7 на стр. 2 обложки). Состояние уплотнений клинового затвора зависит от различных факторов и условий эксплуатации.

Отказы задвижек по герметичности:

— внутренняя негерметичность в затворе, выраженная в превышении допустимой утечки через затвор;

— внешняя негерметичность по материалу корпусных деталей и их соединениям (разъемным и неразъемным), выраженная в превышении допустимой утечки по плотности;

— внешняя негерметичность сальникового уплотнения шпинделя, выраженная в превышении допустимой утечки через сальник.

По типу уплотнений затвора задвижки относятся к арматуре номинально поверхностной, четырехповерхностной [5], т.е. при обеспечении герметичности в затворе участвуют два уплотнения на клине и два уплотнения седел корпуса. При этом два их номинальных контакта — плоскость по плоскости.

Выбору материалов деталей и особенно уплотнений по функциональным параметрам в затворах клиновых задвижек придают большое значение. Для корпусных деталей и клиньев, уплотнений материалы выбирают с учетом энергетических параметров управляемых сред, их химической и механической активности. Материал корпусных деталей обычно соответствует материалу трубопроводов: углеродистые, легированные стали, наплавка уплотнений сплавами В3К, ЦН-6, ЦН-6М, ЦН-6Л, ЦН-12М и др.

По ФГП соблюдение правила единства баз при обработке каждого из уплотнений на клине и в корпусе задвижки во многом определяет точность их угловых параметров и параметров взаимного расположения. Разность углов при сборке затвора 2...10′ (при этом угол уплотнений клина должен быть больше угла уплотнений седел корпуса). Точность формы по плоскостности и шероховатости каждого из уплотнений определяется технологией абразивной обработки шлифованием и притиркой. По суммарной неплоскостности уплотнений для задвижек DN 50—300 мм на PN до 2,5 МПа рекомендуется 1—3 мкм. Параметр шероховатости Ra ⩽ 0,125 мкм [5].

Мониторинг отказов и точность фланцевых РГС. Повреждение разъемных соединений, труб, трубных элементов — одна из причин отказов трубопроводных систем — 36 % (рис. 8 на стр. 2 обложки).

Состояние уплотнений деталей РГС зависит от различных факторов и условий эксплуатации. Особенно при переходе работы системы безопасности и ее элементов из состояния в режиме ожидания в режим срабатывания.

К материалу прокладки фланцевых соединений кроме общепринятых требований, предъявляемых к любому конструкционному материалу (устойчивость против агрессивного воздействия рабочей среды и ее температуры), вводится еще дополнительное требование, учитывающее назначение прокладки — обеспечение

герметичности РГС. Материал прокладки должен быть достаточно пластичным, чтобы при сборке соединения при нагружении прокладки крепежными элементами ее материал, доведенный до пластического состояния, заполнил все микро- и макроотклонения в сопряжении прокладки и замыкающих ее поверхностей фланцев. В рабочих условиях материал, доведенный при сборке до пластического состояния, должен сохранять определенную упругость. В различных конструкциях комбинированных прокладок поверхностный слой выполнен из более мягкого материала, чем материал сердцевины.

Терморасширенный графит (ТРГ) — качественно новый тип уплотнений различного назначения. Эффективность его применения объясняется его технологичностью, коррозионной стойкостью и практически неограниченным сроком службы [8]. Разработаны технологии получения экологически чистых соединений графита, способных вспениваться при нагревании, образуя высокодисперсные порошки пенографита, которые и служат основой для получения широкой гаммы новых углеродных и композитных материалов.

Алюминий и его сплавы широко применяют (например, сплав АД1) при изготовлении плоских прокладок для уплотнения разъемных соединений аппаратов и трубопроводов при давлении рабочей среды до 100 МПа. Основные физико-механические характеристики алюминия (ФПМ): предел текучести $\sigma_т$ = 30...70 МПа; твердость 20...35 НВ; твердость (по десятичной шкале) равна 2,9 (для железа 4,5); коэффициент линейного расширения в интервале температур 0...100 °С $\alpha = 23{,}7\cdot10^{-6}$ 1/°С; коэффициент теплопроводности в интервале температур 0...100 °С λ = 230 Вт/(м·К); плотность ρ = 2,7 г/см^3; теплоемкость в интервале температур 0...100 °С c_p = 0,91 Дж/(г·К).

Медь марок М1 и М3 с повышенной пластической деформацией используют для изготовления прокладок. Перед установкой медных прокладок для снятия остаточных напряжений и повышения пластичности их отжигают при температуре 600...650 °С. Из-за возможности проявления электролиза медные прокладки не рекомендуют устанавливать в соединениях со стальными фланцами при работе с водой, водными растворами солей, кислотами, щелочами, аммиаком. Медные прокладки используют для уплотнения рабочей среды при температуре до 400 °С и давлении до 400 МПа. Основные физико-механические характеристики меди (ФПМ): плотность ρ = 8,5 г/см^3; предел текучести $\sigma_т$ = 60...80 МПа; модуль нормальной упругости $E = 1{,}32\cdot10^{11}$ Па; твердость 35 НВ; твердость деформированной меди 89 НВ (при 20 °С); коэффициент линейного расширения в интервале температур 0...200 °С $\alpha = 17{,}43\cdot10^{-6}$ 1/°С; коэффициент теплопроводности в интервале температур 0...200 °С λ = = 394 Вт/(м·К); теплоемкость в интервале температур 0...200 °С c_p = 0,392 Дж/(г·К).

Никель применяют для уплотнения фланцевых соединений объектов, работающих на воде, насыщенном и перегретом паре, щелочах, нейтральных соляных растворах, аммиаке. При работе с водяным паром, имеющим температуру свыше 430 °С, прокладки из никеля становятся хрупкими [8]. Прокладки из никеля применяют на АЭС. Основные физико-механические характеристики никеля (ФПМ): плотность ρ = 8,75 г/см^3; предел текучести $\sigma_т$ = 120 МПа; модуль нормальной упругости $E = 2{,}5\cdot10^{11}$ Па; твердость 60...80 НВ; коэффициент линейного расширения в интервале температур 0...200 °С $\alpha = 14\cdot10^{-6}$ 1/°С; коэффициент теплопроводности в интервале температур 0...200 °С λ = 95 Вт/(м·К); теплоемкость в интервале температур 0...200 °С c_p = 0,472 Дж/(г·К).

Соблюдение традиционной технологии обработки каждого из уплотнений на фланце определяет точность их линейных и угловых размеров и параметров взаимного расположения. Точность формы, волнистость и шероховатость каждого из уплотнений фланца определяется технологией отделочной обработки. Отклонение от плоскостности уплотнительных поверхностей фланцев не должно превышать 1/5 толщины прокладки, но не более 0,4 мм [8]. Параметр шероховатости уплотнительных поверхностей фланцев Ra = = 1,6 мкм.

Заключение

1. Мониторинг требований к точности уплотнений и деталей основных РГС оборудования, трубопроводов и арматуры позволяет решить первую задачу риск-ориентированного подхода к управлению герметичностью — определение карты отказов систем безопасности контайнмента реактора.

2. Мониторинг требований к точности показал, что на уровне макро- и микрогеометрии

уплотнений РГС различного вида на отклонения формы и параметры шероховатости имеются рекомендации, а для отдельных видов — стандарты организаций, ГОСТ.

3. Уровень требований к точности по форме и шероховатости уплотнений — высокий, диапазон отклонений — от долей до нескольких микрометров.

Библиографический список

1. **Потапов В.В.** Концептуальные положения и задачи риск-ориентированного подхода к управлению безопасной эксплуатацией атомных станций // Компрессорная техника и пневматика. 2017. № 1. С. 44—48.

2. **Потапов В.В.** Алгоритмы взаимосвязи утечки и функциональных параметров обеспечения герметичности подвижных уплотнений валов роторного оборудования систем безопасности контайнмента реактора // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 4. С. 158—165.

3. **Потапов В.В.** Герметичность систем безопасности АЭС // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 6. С. 257—261.

4. **Сейнов С.В.** Трубопроводная арматура. Исследования. Производство. Ремонт. М.: Машиностроение, 2002. 392 с.

5. **Гошко А.И.** Арматура трубопроводная целевого назначения. В 3-х кн. М.: Машиностроение, 2003. 992 с.

6. **Grundfos** Shaft Seal. Grundfos, 2009. 108 p.

7. **Sials SKF.** SKF, 2006. 98 p.

8. **Продан В.Д.** Герметичность разъемных соединений оборудования, эксплуатируемого под давлением рабочей среды. Тамбов: ТГТУ, 2012. 280 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, www.mashin.ru

УДК 621.744.37

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

Сборка установки очистки воздуха

Описаны разработанные установки для очистки воздуха от мелкодисперсных примесей и снижения концентраций дурнопахнущих веществ, превышающих предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе. Приведены основные технические характеристики установок.

The developed installation for cleaning air from fine-dispersed impurities and to reduce the air concentrations of malodorous substances exceeding of permissible concentration in the atmospheric air are described. The main technical characteristics of the installations.

Ключевые слова: сборка, установка очистки воздуха, ультрафиолетовая лампа, электронный пускорегулирующий аппарат, технические характеристики.

Keywords: assembly, installation for cleaning air, UV lamp, electronic control gear, specifications.

С ростом численности населения Земли и загрязнения окружающей среды, чистый воздух и вода становятся дефицитом. Бактериологическое загрязнение питьевых вод, рек и морей, а также воздуха несет угрозу здоровью человека и окружающей среде. Поэтому уделяется большое внимание исследованиям в области эффективного и безопасного обеззараживания воды и воздуха [1—3].

Созданные установки предназначены для очистки воздуха от мелкодисперсных примесей и снижения в воздухе концентраций дурнопахнущих веществ до предельно допустимых согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.567—96. Температура обрабатываемого воздуха, поступающего в установки, 5...40 °С. Климатическое исполнение установок: для эксплуатации их в районах с умеренным климатом с категорией размещения — уличное по ГОСТ 15150—69.

Установки производства ООО ПК "ЛИТ" включают: блок-контейнер, предназначенный для очистки воздуха от мелкодисперсных примесей, запахов сероводорода, аммиака, метана и меркаптанов; ультрафиолетовый (УФ) модуль — для размещения УФ-ламп; блок каталитической засыпки — для размещения каталитической засыпки; блок предварительной очистки воздуха — для предварительной очистки воздуха от пыли и мелкодисперсных частиц; пульт управления — для управления установками и контролем технологических параметров их работы, а также дистанционной передачей данных о работе установок; шкаф с электронными пускорегулирующими аппаратами (ЭПРА) — для размещения ЭПРА, запускающих и регулирующих работу УФ-ламп, а также для обработки и передачи сигнала об исправности УФ-ламп на пульт управления; щит вводный — для ввода и вывода установок из работы.

Блок-контейнер установки разделен внутри герметичной перегородкой на два отсека (рис. 1). В первом отсеке (проточная часть установки) проходит очистка обрабатываемого воздуха, во втором отсеке (машинное отделение) размещены вентилятор и электрооборудование. На входе блок-контейнера установлен диффузор, а на выходе — конфузор, предназначенные для распределения и выравнивания потока воздуха на входе и выходе блок-контейнера соответственно. Выравнивающая решетка распределяет поток обрабатываемого воздуха внутри блок-контейнера.

Воздух поступает в блок-контейнер по воздуховоду через диффузор, в котором расширяется поток воздуха и снижается его скорость.

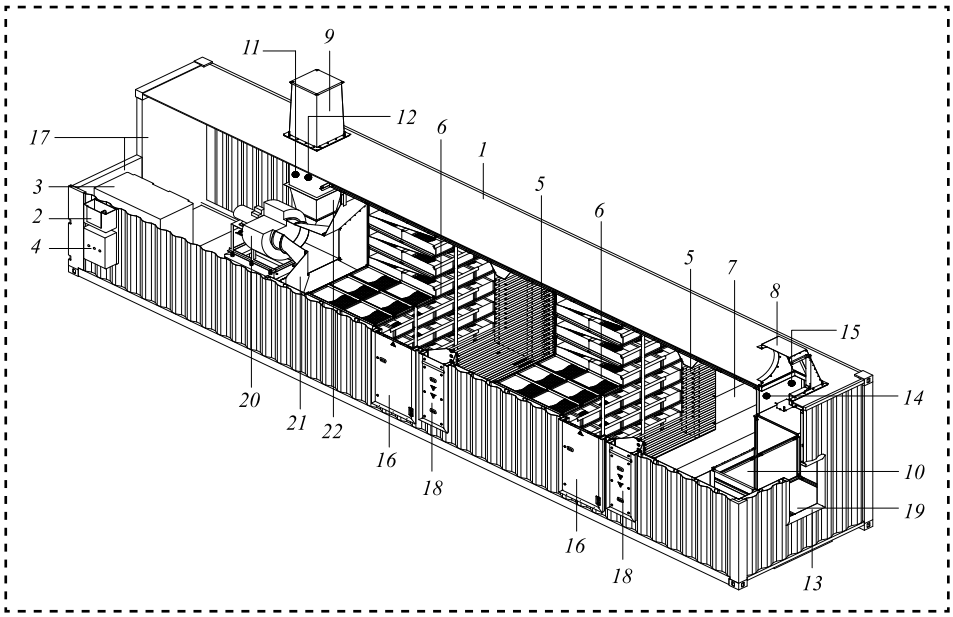


Рис. 1. Установка очистки воздуха от примесей:
1 — блок-контейнер; *2* — пульт управления; *3* — шкаф ЭПРА; *4* — щит вводной; *5* — УФ-модуль; *6* — блок каталитической засыпки; *7* — выравнивающая решетка; *8* — диффузор; *9* — конфузор; *10* — фильтр F5; *11* — датчик температуры; *12* — индикатор протока воздуха; *13* — люк обслуживания блока предварительной очистки воздуха; *14* — датчик метана; *15* — датчик сероводорода; *16* — дверь обслуживания блок-контейнера; *17* — дверь обслуживания машинного отделения; *18* — люк обслуживания УФ-модуля; *19* — сетка каплеотбойника (фильтр G3); *20* — вентилятор; *21* — перегородка; *22* — воздуховод

Затем обрабатываемый воздух проходит через блок предварительной очистки, состоящий из сетки каплеотбойника и фильтра F5, где происходит предварительная очистка воздуха от пыли и мелкодисперсных частиц, после чего воздух через выравнивающую решетку поступает на первую стадию очистки.

На первой стадии очистки воздух обрабатывают озоном и различными радикалами, образующимися в процессе работы специальных УФ-ламп, установленных в УФ-модуле. Озон и радикалы окисляют вредные вещества, содержащиеся в воздухе, в том числе аммиак, сероводород и меркаптаны. Окисление происходит в два этапа: первичное — в объеме блок-контейнера между УФ-лампами и блоком каталитической засыпки; вторичное — непосредственно на поверхности каталитической засыпки. Продукты реакций окисления — нейтральные соединения (соли неорганических кислот, углекислый газ и пары воды), оседающие в блоке каталитической засыпки. Пройдя через блок каталитической засыпки, обрабатываемый воздух поступает на вторую стадию очистки, которая по технологии очистки повторяет первую стадию. После второй стадии очистки очищенный воздух через конфузор поступает в атмосферу.

В машинном отделении установлены вентилятор, обеспечивающий прохождение через установку заданного проектом расхода воздуха, и шкаф ЭПРА.

В блок-контейнере установлены датчик температуры, необходимый для контроля температуры обрабатываемого воздуха, индикатор протока воздуха, контролирующий прохождение воздуха через установку. Также внутри блок-контейнера установлены датчики, контролирующие в обрабатываемом воздухе концентрацию метана и сероводорода. Степень загрязнения фильтра F5 и сетки каплеотбойника в шкафу ЭПРА определяют двумя дифманометрами.

Кабели ламповые, датчиков, питания электродвигателя вентилятора проложены в лотках и герметично отделены от проточной части установки.

Для обслуживания блок-контейнера и машинного отделения предусмотрены двери и люки, которые во время работы установки должны быть закрыты.

УФ-модуль состоит из короба, верхнего и нижнего порожка (рис. 2). В коробе установлены

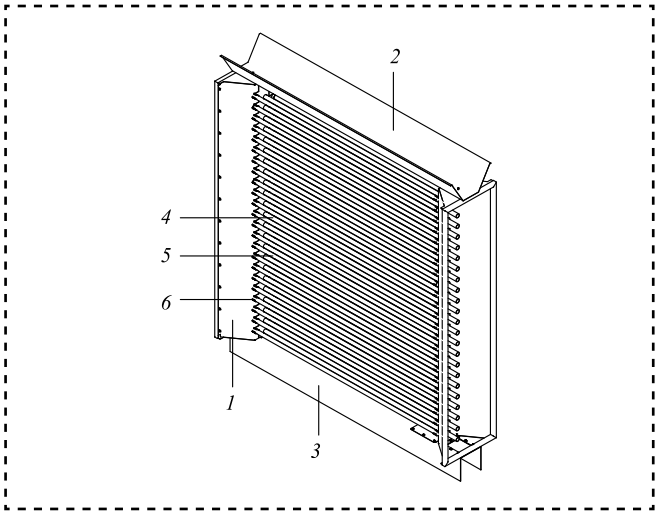


Рис. 2. УФ-модуль:
1 — короб; *2* — верхний порожек; *3* — нижний порожек; *4* — УФ-лампа; *5* — трубка; *6* — защелка

24 УФ-лампы, предназначенные для генерации окислителя (озона). УФ-лампы защищены от механического повреждения с помощью горизонтально расположенных с двух сторон стальных труб диаметром 30 мм. При необходимости (например, для замены или промывки УФ-ламп) трубы можно извлечь из УФ-модуля, отщелкнув защелки. Герметичность лампы обеспечивается уплотнительным кольцом.

Блок каталитической засыпки состоит из двух задних и двух передних стоек (рис. 3). Между стойками установлены секции с ящиками, в которых находится каталитическая засыпка.

Блок предварительной очистки воздуха (рис. 4) состоит из каплеотбойников и фильтров F5, закрепленных на каркасе гайками. Обрабатываемый воздух после диффузора проходит через каплеотбойники, затем через фильтр F5, после которого поступает на первую стадию очистки.

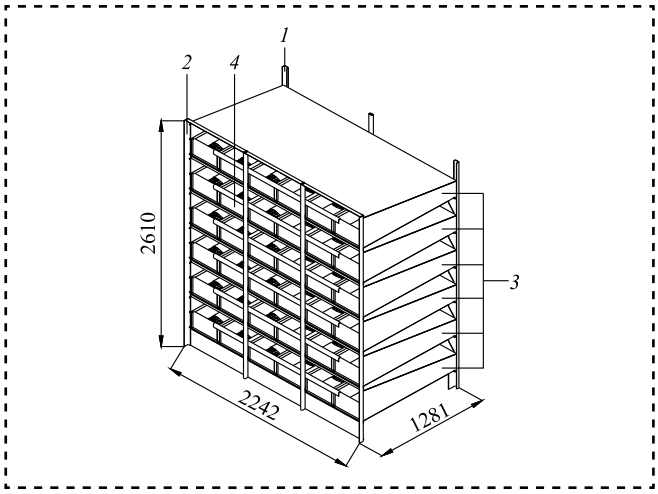


Рис. 3. Блок каталитической засыпки:
1 — стойка задняя; *2* — стойка передняя; *3* — секция; *4* — ящик

На двери корпуса пульта управления расположена панель управления установкой (рис. 5).

Внутри пульта управления на монтажной панели установлены термостат, нагреватель, автоматический выключатель и блок клеммных зажимов.

Панель пульта управления служит для индикации состояния установки, настройки ее технологических параметров и управления отдельными компонентами установки (рис. 6).

На ней расположены следующие элементы управления и сигнализации: *1* — лампа сигнальная "СЕТЬ" (зеленая) сигнализирует о подаче сетевого питания на пульт управления; *2* — лампа сигнальная "ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ" (желтая) сигнализирует о том, что некоторые технологические параметры установки не соответствуют номинальным значениям, но установка функционирует в полном объеме; *3* — лампа сигнальная "АВАРИЯ" (красная) сигнализирует об аварийном состоянии установки; *4* — панель оператора; *5* — кнопка "ПУСК" включения установки; *6* — кнопка "СТОП" выключения установки; *7* — переключатель "МЕСТН./ДИСТ." (местное — дистанционное) для выбора режима управления установкой.

В машинном отделении блок-контейнера размещен шкаф ЭПРА, состоящий из корпуса, установленного на цоколе (рис. 7).

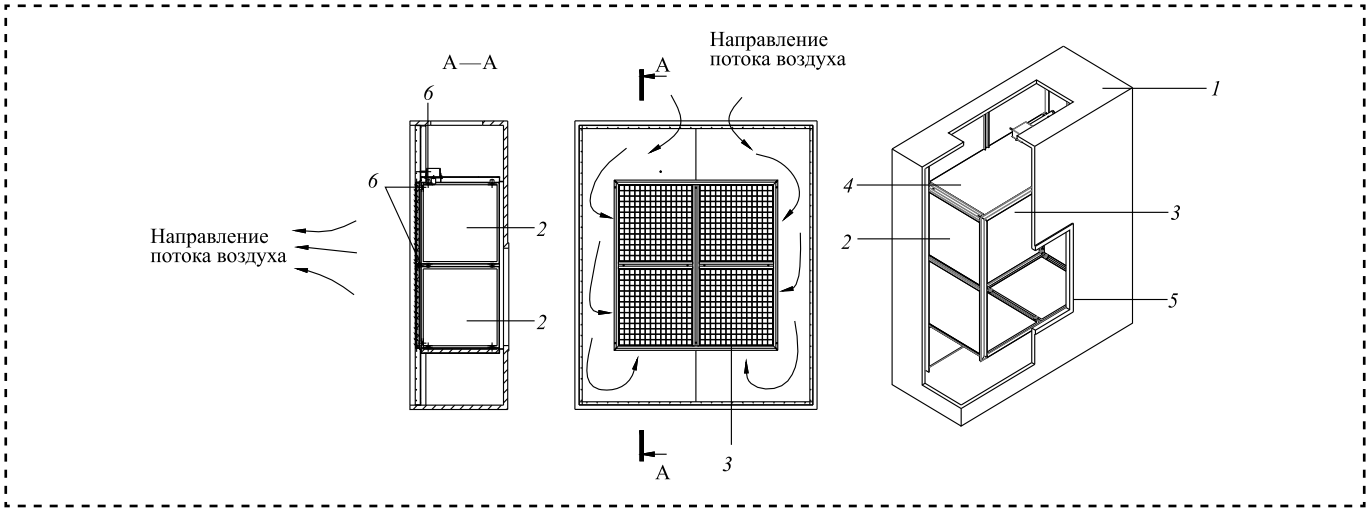


Рис. 4. Блок предварительной очистки воздуха:
1 — корпус блока-контейнера; *2* — каплеотбойник; *3* — фильтр F5; *4* — каркас блока предварительной очистки воздуха; *5* — люк обслуживания; *6* — гайка-барашек

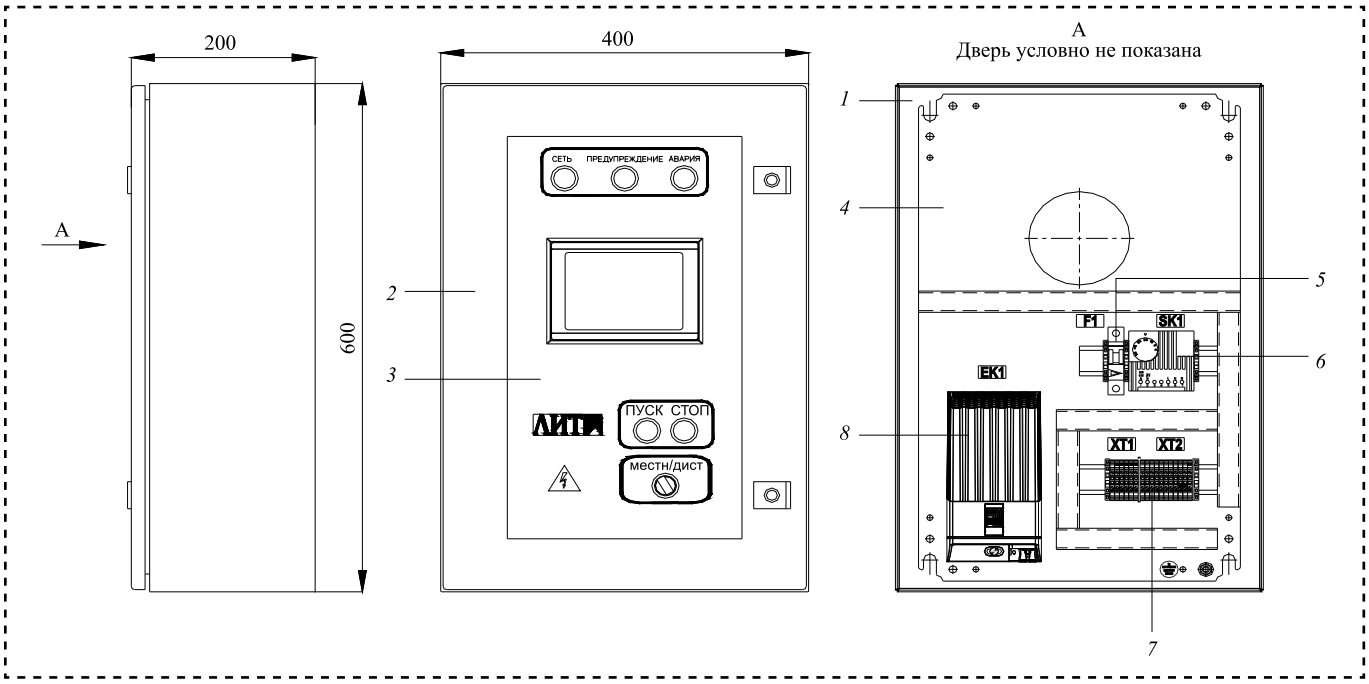


Рис. 5. Пульт управления:
1 — корпус; *2* — дверь; *3* — панель управления; *4* — монтажная панель; *5* — автоматический выключатель; *6* — термостат; *7* — блок клеммных зажимов; *8* — нагреватель

Для вентиляции на дверях шкафа ЭПРА установлены вентиляционные решетки; для контроля температуры воздуха внутри шкафа — датчик температуры и термостат.

В шкафу ЭПРА размещены восемь групповых ЭПРА, а также элементы управления и контроля

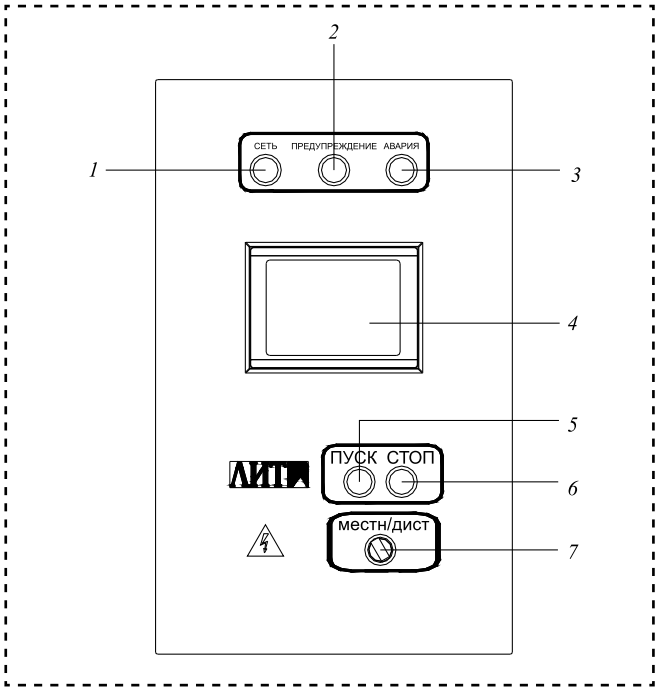


Рис. 6. Панель пульта управления

работы УФ-ламп и силовой коммутации. В нижней части шкафа ЭПРА находятся нагреватели. Подвод ламповых кабелей, кабелей датчиков осуществлен через кабельные вводы и гермовводы, установленные на задней панели цоколя.

ЭПРА предназначен для включения и обеспечения нормальной работы шести УФ-ламп и обеспечивает предварительный прогрев электродов, поджиг и рабочий режим УФ-ламп. ЭПРА состоит из корпуса, в который вставлены четыре платы и вентилятор. Одна из плат — плата питания (ИП), остальные — двухканальные ламповые платы (ДК). Ламповая плата контролирует работу двух УФ-ламп, и на ней установлены два светодиода, которые могут индицировать длинный или короткий импульс. При выключенной лампе светодиод не светится. Если лампа работает нормально, то светодиод светится постоянно. В случае неисправности светодиод мигает. Последовательность импульсов светодиодов отражает состояние ЭПРА (этапы работы) или характеристику неисправности (код ошибки).

Если УФ-лампа не горит, то необходимо проверить и при необходимости заменить плату (ИП и/или ДК) или соответствующую УФ-лампу.

В случае выхода из строя вентилятора или других элементов корпуса ЭПРА необходима замена корпуса ЭПРА.

Щит вводной состоит из корпуса, на боковой панели которого установлен главный выключатель

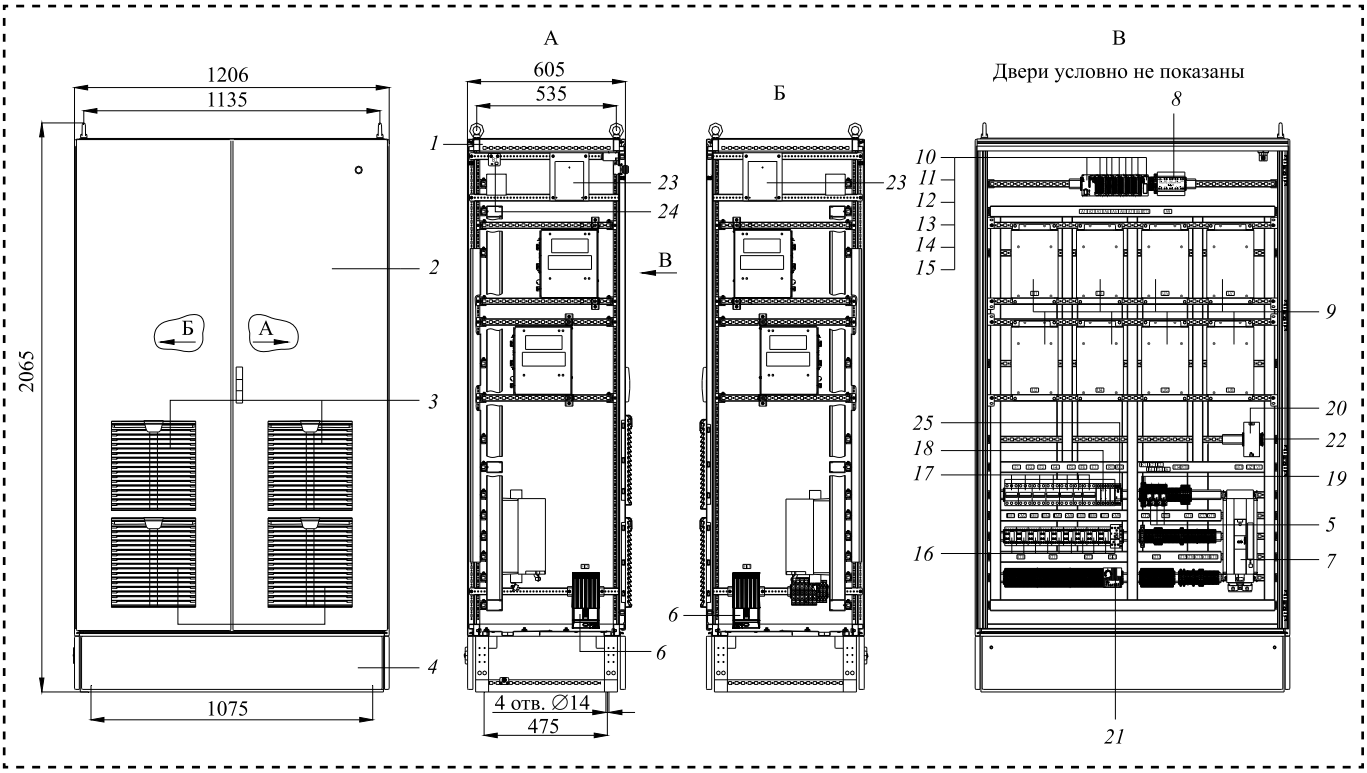


Рис. 7. Шкаф ЭПРА:

1 — корпус; *2* — дверь; *3* — вентиляционная решетка; *4* — цоколь; *5* — вентилятор; *6* — реле; *7* — частотный преобразователь; *8* — контроллер управления мощностью ламп; *9* — групповой ЭПРА; *10* — процессорный модуль; *11* — модуль дискретного вывода; *12* — модуль дискретного ввода; *13* — аналоговый модуль; *14* — коммуникационный процессор; *15* — интерфейсный модуль; *16* — контактор; *17* — автоматический выключатель; *18* — ограничитель перенапряжения класс С; *19* — модуль релейного интерфейса; *20* — источник питания; *21* — термостат; *22* — защита от перенапряжения; *23* — дифманометр; *24* — датчик температуры; *25* — реле контроля фаз

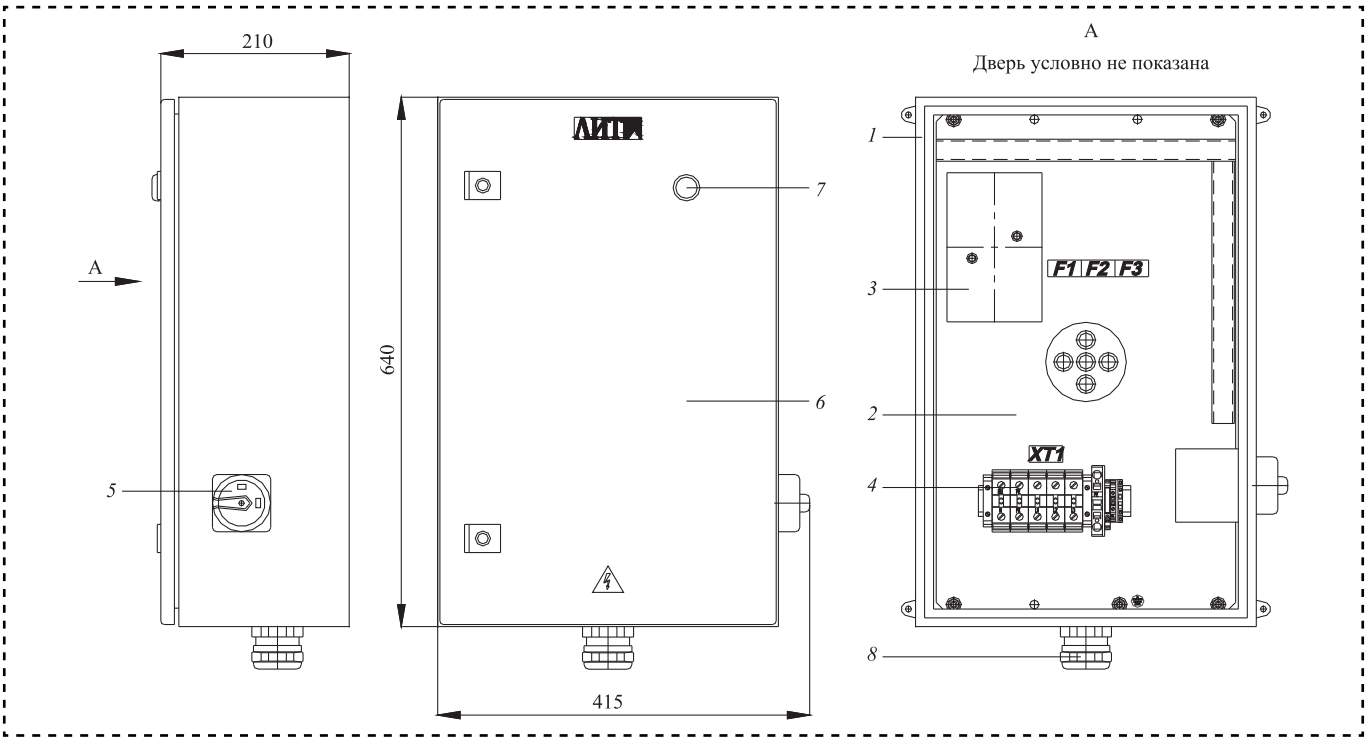


Рис. 8. Щит вводной:

1 — корпус; *2* — монтажная панель; *3* — держатель-разъединитель плавкой вставки; *4* — блок клеммных зажимов; *5* — главный выключатель; *6* — дверь; *7* — сигнальная лампа; *8* — гермовод

Основные технические характеристики установок

Характеристика	Модель установки			
	ВЕНТЛИТ-15000	ВЕНТЛИТ-10000	ВЕНТЛИТ-5000	ВЕНТЛИТ-2000
Габаритные размеры, мм:				
длина	12 100		9100	6100
ширина	2450			
высота	2890		2590	
Максимальная масса, кг:				
при хранении	11 500	11 000	8000	5000
в рабочем состоянии	15 000	14 000	9650	5650
Габаритные размеры присоединительных фланцев, мм:				
на входе	∅630			∅400
на выходе	500×500			350×350
Напряжение питания, В	380			
Мощность, потребляемая со штатным вентилятором, кВт	51	39	21,9	10,4
Число ламп	52	48	24	10
Масса засыпки, кг	3500	3000	1650	650

для включения или выключения установки (рис. 8).

На двери вводного щита установлена лампа зеленого цвета, сигнализирующая о подаче питания на установку, а внутри — монтажная панель, на которой размещены держатель-разъединитель плавкой вставки и блок клеммных зажимов. В нижней части вводного щита установлен гермовод для подвода кабеля питания установки.

Установка может работать в следующих режимах: местного управления и контроля и дистанционного контроля.

К функциям пульта управления установки относят: контроль исправности каждой УФ-лампы и ЭПРА; учет времени наработки и числа включений комплекта УФ-ламп; учет времени наработки и числа включений установки; включение/выключение УФ-ламп; аварийное отключение установки при перегреве пульта управления, шкафа ЭПРА или блок-контейнера; контроль наличия потока воздуха в блок-контейнере; управление работой вентилятора с помощью частотного преобразователя, установленного в шкафу ЭПРА; контроль концентрации сероводорода и метана в потоке обрабатываемого воздуха; контроль загрязнения фильтров F5 и G3.

Основные технические характеристики установок представлены в таблице.

Разработанные установки очистки воздуха применяют в различных областях: пищевая промышленность, медицина, фармацевтическое производство, сельское хозяйство, транспорт, объекты социальной сферы и др.

Основываясь на собственных исследованиях и мировом опыте обработки воздуха в системах вентиляции и кондиционирования, созданы удобные в использовании, энергоэффективные, малогабаритные и безопасные в эксплуатации установки обеззараживания воздуха на основе амальгамных ламп.

Библиографический список

1. **Микаева С.А., Микаева А.С., Железникова О.Е.** Системы обеззараживания ультрафиолетом // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 2. С. 44—48.

2. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Системы обеззараживания ультрафиолетовым излучением // Справочник. Инженерный журнал. 2015. № 11. С. 59—64.

3. **Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И.** Сборка корпусных установок с амальгамными лампами типа УДВ-А для обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 5. С. 28—32.

УДК 620.3

П.В. Королёв *(Ивановский государственный политехнический университет),*
М.А. Шилов, *канд. техн. наук (Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина),*
С.В. Королева, *д-р мед. наук (Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России),*
В.В. Королев *(Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина)*
E-mail: vedunkp@rambler.ru

Модель прогнозирования физико-механических параметров нанокомпозиционных материалов в условиях трибоконтакта

Представлена модель оценки энергетического состояния трибологической системы, позволяющая прогнозировать основные физико-механические параметры при трении. В решении задачи использованы элементы энергетического подхода к описанию процесса трения.

The model for evaluating the energy state of the tribological system to predict the fundamental physical and mechanical properties in friction is presented. Elements of the energy approach to the friction process in the decision of marked task are used.

Ключевые слова: энергетическое состояние, трибологическая система, физико-механические параметры, трение.

Keywords: energy state, tribological system, physical and mechanical properties, friction.

Один из объективных показателей оценки основных физико-механических параметров трибологической системы, включающей в себя нанокомпозитные пары трения, — энергия системы, зависящая от многих факторов, таких как коэффициент трения и структура материала трущихся поверхностей.

В качестве объекта математического моделирования выбрана трибосистема, состоящая из пары трения (сталь — сталь, сталь — сталь с медным напылением) и базового смазочного материала (СМ). Трущиеся поверхности предполагаются идеально гладкими, т.е. шероховатостью поверхностей трения пренебрегаем. При моделировании решали задачу оценки энергии E трибосистемы в процессе трения в зависимости от внешних факторов, влияющих на ее величину и определяющих процессы, проходящие в системе.

Процесс трения поверхностей по схемам диск — диск, сфера — сфера в условиях наноуровня представляется как параллельное перемещение одной поверхности трения относительно другой в присутствии между ними смазочной среды (воздух, вода, масло и т.д.). Молекулы в смазочном слое в определенном энергетическом состоянии могут иметь различную форму — круглую, овальную, модельную форму полярных жидкостей (круг с хвостом) и занимать различные энергетические уровни, тем самым определяя адсорбционные свойства СМ. В свою очередь, в зависимости от атомной (молекулярной) структуры трущихся поверхностей они также влияют на адсорбционную активность СМ. Для стационарных процессов течение СМ описывается уравнением Навье—Стокса:

$$\eta\left(\frac{\partial^2 \mathrm{v}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \mathrm{v}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \mathrm{v}}{\partial z^2}\right)=0, \qquad (1)$$

где η — динамическая вязкость СМ;

v — скорость течения СМ.

В случае учета одной переменной и с учетом начальных и граничных условий формула примет вид:

$$\begin{cases} \eta\dfrac{d^2\mathrm{v}}{dz^2}=0; \\ z=z_0 : \mathrm{v}=0; \\ z=h^*-z_0 : \mathrm{v}=u, \end{cases} \qquad (2)$$

где z_0 — толщина адсорбированного на поверхностях трения слоя молекул СМ;

u — относительная скорость стационарного течения, $u = \omega R$;

h^* — толщина зазора между поверхностями. С учетом того, что:

$$\begin{cases} 0 = cz_0 + d; \\ u = c\left(h^* - z_0\right) + d, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c = \dfrac{u}{h^* - 2z_0}; \\ d = \dfrac{uz_0}{2z_0 - h^*}. \end{cases} \quad (3)$$

В результате математических преобразований получим выражение для определения скорости течения смазочного материала на любой высоте от нижней пластины:

$$\mathrm{v}\left(z\right) = \frac{u}{h^* - 2z_0} z - \frac{uz_0}{h^* - 2z_0} = \frac{u}{h^* - 2z_0}\left(z - z_0\right). \quad (4)$$

Поскольку толщина пристенного слоя много меньше расстояния между пластинами ($z_0 << h^*$), то выражение (4) примет вид:

$$\mathrm{v}\left(z\right) = \frac{u}{h^*}\left(z - z_0\right). \quad (5)$$

При создании модели учтены параметры универсальной машины трения МТУ-01 в целях адекватного сопоставления теоретически предсказанных параметров и полученных экспериментальным путем. Для этого математически описана методика расчета коэффициента трения, полученного при помощи этой машины.

Дифференциал момента трения $dM_{\text{тр}}$ вращения определяется как произведение радиуса тела R вращения и приложенного дифференциала силы dF:

$$dM_{\text{тр}} = RdF(R). \quad (6)$$

В зависимости от формы пары трения дифференциал силы

$$dF(R) = \mu p dS,$$

где p — давление в контакте, Па;

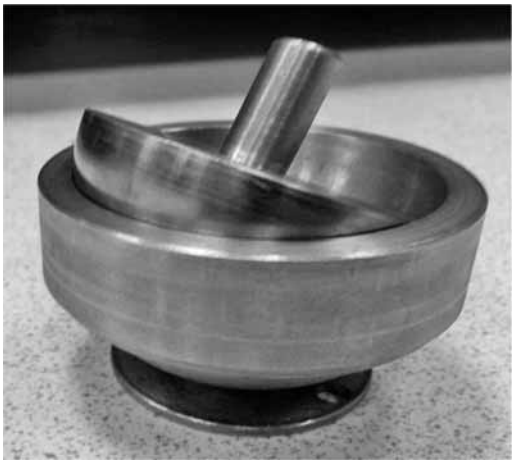
μ — коэффициента трения;

dS — площадь трения, м^2.

В машине МТУ-01 верхняя поверхность вращается относительно неподвижной нижней поверхности со скоростью v, зависящей от рассматриваемой высоты (рисунок) [2].

Давление p, возникающее в смазочном слое высотой h^*:

$$p = \eta \mathrm{v}(z)/h^*.$$



Пара трения шар в шаре

В соответствии с теорией И.Я. Френкеля [1] динамическая молекулярная вязкость характеризуется молекулярными параметрами

$$\eta = \frac{kT\tau_0}{\pi r_m l^2} e^{\frac{E}{kT}}, \quad (7)$$

где r_m — радиус молекулы;

τ_0 — время релаксации;

l — межчастичное расстояние.

Площадь шаровой поверхности: $S^* = 4\pi R^2$, а для половины шара имеем $S = 2\pi R^2$. Для нахождения силы определим дифференциал площади половины шара:

$$dS = 4\pi R dR. \quad (8)$$

Подставляя полученный результат в выражение для дифференциала силы, имеем:

$$dF(R) = \mu p 4\pi R dR. \quad (9)$$

Тогда искомый момент трения с учетом формул (5), (7) примет вид:

$$M_{\text{тр}} = \frac{\pi\mu\omega R^4}{\left(h^*\right)^2}\left(z - z_0\right)\frac{kT\tau_0}{\pi r_m l^2} e^{\frac{E}{kT}}. \quad (10)$$

С другой стороны, по второму закону динамики для вращательного движения, изменение момента импульса вращающегося тела равно произведению момента силы, действующего на тело, на время действия этого момента:

$$M_{\text{тр}}\Delta t = J\omega_2 - J\omega_1, \quad (11)$$

где J — момент инерции шара; ω_1 и ω_2 — начальная и конечная угловые скорости.

Так как $\omega_1 = 0$ и $\Delta t = t$, то $M_{тр}\Delta t = J\omega_2 = J\omega$, откуда

$$M_{тр} = J\omega/t. \quad (12)$$

Момент инерции шара относительно его геометрической оси $J = 2/5mR^2$, в нашем случае этот момент уменьшается в 2 раза. Подставив это выражение в формулу (12), найдем

$$M_{тр} = \frac{mR^2\omega}{5t}. \quad (13)$$

Представив массу шара в виде произведения плотности на объем и учитывая, что $V_{шара} = \frac{4\pi}{3}R^3$, получим окончательное выражение для момента трения с точки зрения теоретической механики:

$$M_{тр} = \frac{4}{15}\frac{\pi\rho R^5\omega}{t}, \quad (14)$$

где t — время, фиксированное для каждого эксперимента.

Приравняв обе правые части выражений для момента трения из формул (10) и (14), получим:

$$\frac{\pi\mu R^4}{(h^*)^2}(z - z_0)\frac{kT\tau_0}{\pi r_m l^2}e^{\frac{E}{kT}} = \frac{4}{15}\frac{\pi\rho R^5\omega}{t}. \quad (15)$$

Из последней формулы найдем выражение для энергии:

$$E = kT\ln\left[\frac{4}{15}\frac{\pi\rho R(h^*)^2 r_m l^2}{\mu kT\tau_0 t(z - z_0)}\right]. \quad (16)$$

Эволюция этой энергии складывается из многих параметров. Самые важные — энергия теплового движения молекул, коэффициент трения, показывающий влияние рода вещества, из которых состоят пары трения и молекулярные параметры смазочного материала.

Получены расчетные формулы для описания эволюции энергии в различных схемах пар трения, используемых в эксперименте:

$$E = kT\ln\varepsilon_i\gamma,$$

где γ — безразмерный параметр, характеризующий воздействие на систему макро- и микрофакторов: структуру пар трения, структурные особенности СМ, внешние условия (нагрузку, скорость вращения), $\gamma = \frac{\pi\rho R(h^*)^2 r_m l^2}{\mu kT\tau_0 t(z - z_0)}$;

ε_i — поправочный коэффициент, отражающий зависимость геометрии поверхности трения, $i = 1, ..., 3$; $\varepsilon_1 = 2$ — схема трения диск — плоскость; $\varepsilon_2 = 4/15$ — схема трения шар в шаре; $\varepsilon_3 = 3/4$ — схема трения сегмент шара в шаре.

Примерный расчет эволюции энергии системы при трении для различных пар

Изменение энергии трибосистемы, полученное в ходе математического моделирования с учетом полученных экспериментальных результатов, коррелируется с изменением энергии, полученной методом молекулярного моделирования. Данные, используемые в расчете:

Постоянная Больцмана, Дж/К . . . . . $1{,}38\cdot10^{-23}$
Температура, К 300
Плотность стали 45, кг/м^3. 7826
Радиус шара R, м 0,025
Толщина смазочного слоя h^*, м . . . . . 10^{-5}
Время до остановки t, с. 1

Числовые значения для эволюции энергии трибосистемы, отражающие зависимость энергии системы от геометрии пары трения, эВ:

$$E_i = 1{,}38\cdot10^{-23}\cdot300\ln\varepsilon_i\times$$
$$\times\frac{3{,}14\cdot7826\cdot0{,}025\cdot(10^{-5})^2\cdot5\cdot10^{-10}\cdot(10^{-10})^2}{0{,}1\cdot1{,}38\cdot10^{-23}\cdot300\cdot10^{-8}\cdot1\cdot(10^{-9}-10^{-10})} =$$
$$= 414\cdot10^{-23}\ln\varepsilon_i\cdot82{,}35;$$
$$E_1 = 414\cdot10^{-23}\ln2\cdot82{,}35 = 2{,}1;$$
$$E_2 = 414\cdot10^{-23}\ln(4/5)\cdot82{,}35 = 1{,}27;$$
$$E_3 = 414\cdot10^{-23}\ln(3/4)\cdot82{,}35 = 1{,}7.$$

Эмпирическое исследование на основе полученной математической модели проведено с использованием разработанной авторами полезной модели "Трибологическая ячейка для исследования жидких нанокомпозитов" [2]. Получены значимые корреляционные взаимосвязи зависимости коэффициента трения от нагрузки, отклонение значений которых от аналогичных, полученных с помощью разработанной модели трения, составило менее 5 %.

Выводы

1. Получена математическая модель, позволяющая прогнозировать некоторые физико-механические макро- и нанопараметры трибосистемы: коэффициент трения, нагрузку, характерные размеры молекул смазочного материала, структуру поверхностей трения.

2. Адекватность полученной модели подтверждена корреляцией с экспериментальными данными для различных поверхностей трения и схем контакта.

Библиографический список

1. **Основы** трибологии / под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Наука и техника, 1995. 778 с.

2. **Трибологическая** ячейка для исследования жидких нанокомпозитов: пат. 163668 Рос. Федерация: МПК G 01 N 3/56 / П.В. Королёв, М.А. Шилов, В.В. Королев, С.В. Королева; заявитель и патентообладатель П.В. Королёв. № 2016108670; заявл. 10.03.16; опубл. 12.06.16, Бюл. № 21.

3. **Шилов М.А.** Смазочное действие водных растворов неионогенных ПАВ при трении пары металл — полимер: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / М.А. Шилов. Иваново: Ивановский государственный университет, 2011. 148 с.

УДК 621.793.7

В.А. Полетаев, *д-р техн. наук,* **Е.В. Шпенькова**, **А.А. Голяс**
(Ивановский государственный энергетический университет)
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

Исследование механических характеристик поверхностного слоя деталей электронасосов, упрочненных алмазным выглаживанием

Рассмотрен процесс комбинированного упрочнения деталей из стали 45, состоящий в нанесении покрытия из хрома с ультраалмазами, последующем точении и алмазном выглаживании поверхности. Приведены результаты сравнительного исследования механической обработки и изнашивания поверхностей деталей из сталей 45, 12Х18Н10Т и 40Х13.

The combined hardening process of steel parts 45 consisting in coating is applied of chromium with ultra-diamonds and diamond turning subsequently smoothing the surface is considered. The results of a comparative study of the mechanical surface treatment of steel parts 45, 12X18H10T and 40X13 are presented.

Ключевые слова: упрочнение, покрытие, твердость, шероховатость, качество поверхности, износ, ультраалмаз.

Keywords: hardening, cover, hardness, roughness, surface quality, wear, ultra-diamond.

Введение

Потери металла в результате износа и коррозии составляют ежегодно десятки миллионов тонн и оцениваются в десятки миллионов рублей. Огромные материальные и трудовые ресурсы расходуются на изготовление запасных частей и ремонт техники. Мощности ремонтных предприятий во многих отраслях промышленности значительно превышают мощности заводов-изготовителей техники. В большинстве случаев техника выходит из строя вследствие износа загруженных деталей (узлов трения): разрушаются только рабочие поверхности (поверхности трения) деталей, которые либо отправляют в металлолом на переплавку, либо

восстанавливают нанесением слоев металла со специальными свойствами. В результате нанесения таких покрытий не только восстанавливают размеры деталей, но и упрочняют их поверхности. Поэтому детали с покрытиями обычно имеют высокую износостойкость и служат в несколько раз дольше, чем детали без покрытий. Еще большую эффективность дает применение покрытий при создании новой или модернизации существующей техники.

Центробежные насосы и электродвигатели насосных агрегатов для подачи воды и водных растворов часто выходят из строя из-за разрушения поверхностей трения в местах контакта с резинометаллическими подшипниками и жидкостью, проходящей через элементы узлов агрегата. Кроме того, детали электронасосных агрегатов испытывают воздействия факторов внешней среды (влага, песок, резкая смена температуры, агрессивные газы и аэрозоли, контакты с морской водой и щелочными растворами). Повышение долговечности машин и конструкций тесно связано с проблемой повышения износостойкости металлических сплавов. Целенаправленное изменение свойств поверхностных слоев детали путем использования покрытий и поверхностной механической обработки для уменьшения износа и увеличения коррозионной стойкости — хорошо известная и развитая технология. Однако это направление становится все более важным вследствие того, что требования к физико-механическим и химическим свойствам конструкционных материалов становятся все более жесткими.

Цель исследований — повышение износо- и коррозионной стойкости поверхностей трения на примере узлов электронасосных агрегатов для подачи воды упрочняющей обработкой, включающей нанесение покрытия и последующего его поверхностно-пластического деформирования алмазным выглаживанием.

В электродвигателях разрушается в основном рабочая поверхность деталей (втулки, валы), которая контактирует с подшипниками и с жидкой массой. Обычно эти детали изготавливают из дорогостоящих сталей — 40Х13 и 12Х18Н10Т. Получить требуемое качество рабочих поверхностей деталей агрегатов можно за счет замены сталей 12Х18Н10Т и 40Х13 на более дешевую сталь 45 и применения многокомпонентных покрытий, например, хромированных покрытий с ультраалмазами [1—2].

Для получения хромированных покрытий с ультраалмазами использовали ванну хромирования, резервуар, циркуляционный насос, фильтры и трубопроводы. Состав электролита: CrO_3, ультраалмазы, H_2SO_4. Технические характеристики ультраалмазов: размер частиц — 4...8 нм (первичные микрокристаллиты 20...30 нм — первичные агрегаты); удельная поверхность — (300 + 30) $м^2/г$; фазовый состав: кубический алмаз — 80...100 %; алмазоподобный рентгеноаморфный углерод — до 20 %; массовая доля примесей — не более 3,0 %. Толщина полученного покрытия составляет 20 мкм.

При выглаживании обрабатываемая поверхность пластически деформируется скользящим по ней инструментом. При этом неровности поверхности, оставшиеся от предшествующей обработки, сглаживаются частично или полностью, поверхность приобретает зеркальный блеск, повышается твердость поверхностного слоя, в нем образуются сжимающие остаточные напряжения, изменяется микроструктура, и создается направленная текстура. После выглаживания поверхность остается чистой, не шаржированной осколками абразивных зерен, что обычно происходит при абразивной обработке. Такое сочетание свойств выглаженной поверхности предопределяет ее высокие эксплуатационные качества — износостойкость, сопротивление усталости и т.д.

Эксплуатационные характеристики деталей машин определяются качеством поверхностного слоя.

В тонком поверхностном слое возникают усталостные трещины, происходят процессы коррозии и начинается изнашивание. На процессы изнашивания при контактном взаимодействии оказывают влияние как геометрические параметры поверхностного слоя (макроотклонения, волнистость, шероховатость), так и физико-механические свойства (твердость и остаточные напряжения, глубина и степень деформационного упрочнения, структурное состояние металла).

Направление микронеровностей и их форма также оказывают влияние на характеристики трения и изнашивание деталей. Так, например, наибольший коэффициент трения наблюдается при одинаковом направлении к их движению.

При малой высоте и параллельном направлении неровностей наблюдается схватывание и повышенное изнашивание. Изменение величины износа определяется и формой микронеровностей, в частности, радиусом их выступов.

Более сильное деформационное упрочнение влияет на износостойкость пластичных и сравнительно мягких сталей. Это объясняется тем, что несущая способность трущихся поверхностей в значительной степени определяется пластическими свойствами поверхностного слоя, в частности напряжением текучести, а также запасом пластичности. Предварительное поверхностное упрочнение вызывает повышение напряжения текучести металла, увеличивая тем самым его несущую способность. У пластичных металлов запас пластичности более высок, а следовательно, выше и запас работоспособности в условиях контактного взаимодействия.

Технология упрочнения деталей с покрытием алмазным выглаживанием (АВ) включает следующие этапы:

— токарная обработка (точение) на станке типа ИЖ 250 ИТВМФ1 при режимах: n = 800 мин$^{-1}$, S = 0,15 мм/об;

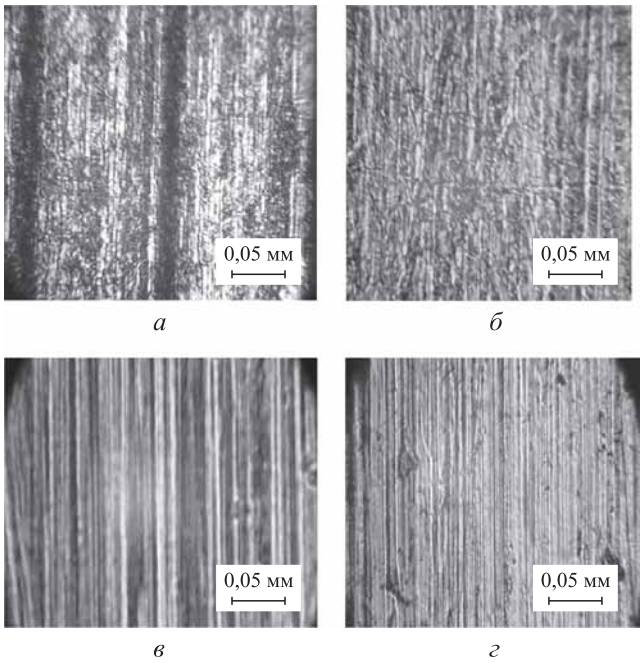


Рис. 1. Поверхность сталей (вид сверху):
а — 40Х13 после точения; *б* — 40Х13 после точения и алмазного выглаживания; *в* — 12Х18Н10Т после точения; *г* — 12Х18Н10Т после точения и алмазного выглаживания

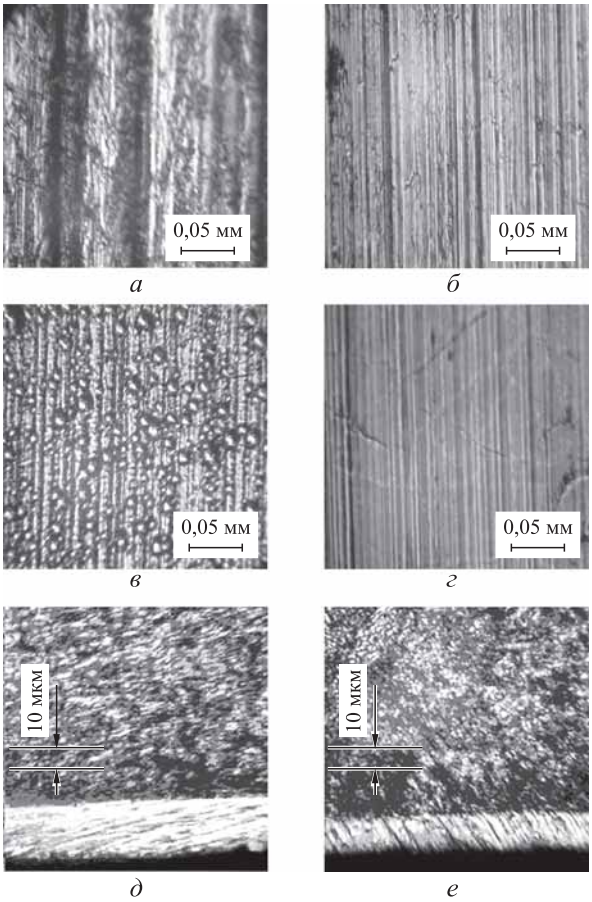


Рис. 2. Поверхность стали 45 (вид сверху):
а — после точения; *б* — после точения и алмазного выглаживания; *в* — с нанесенным слоем хрома и ультраалмазами после точения; *г* — после точения и алмазного выглаживания слоя хрома с ультраалмазами; *д* — с нанесенным слоем хрома с ультраалмазами (продольный разрез) после точения; *е* — с нанесенным слоем хрома и ультраалмазами (продольный разрез) после точения и алмазного выглаживания

— алмазное выглаживание при режимах: n = 200 мин$^{-1}$, S = 0,015 мм/об.

Сила выглаживания — 200 Н для неупрочненных деталей и 300 Н для деталей, упрочненных термообработкой (ТО) или нанесением гальванопокрытия из хрома с ультраалмазами (УА).

На рис. 1 представлены фотографии поверхности сталей 40Х13 и 12Х18Н10Т, а на рис. 2 — стали 45 после упрочнения.

Гистограммы на рис. 3 показывают изменение микротвердости и параметра шероховатости *Ra* стали 45 в зависимости от метода механической обработки. Максимальная твердость после ТО, точения, АВ составляет 550 HV, после нанесения покрытия из хрома с УА и с последующим

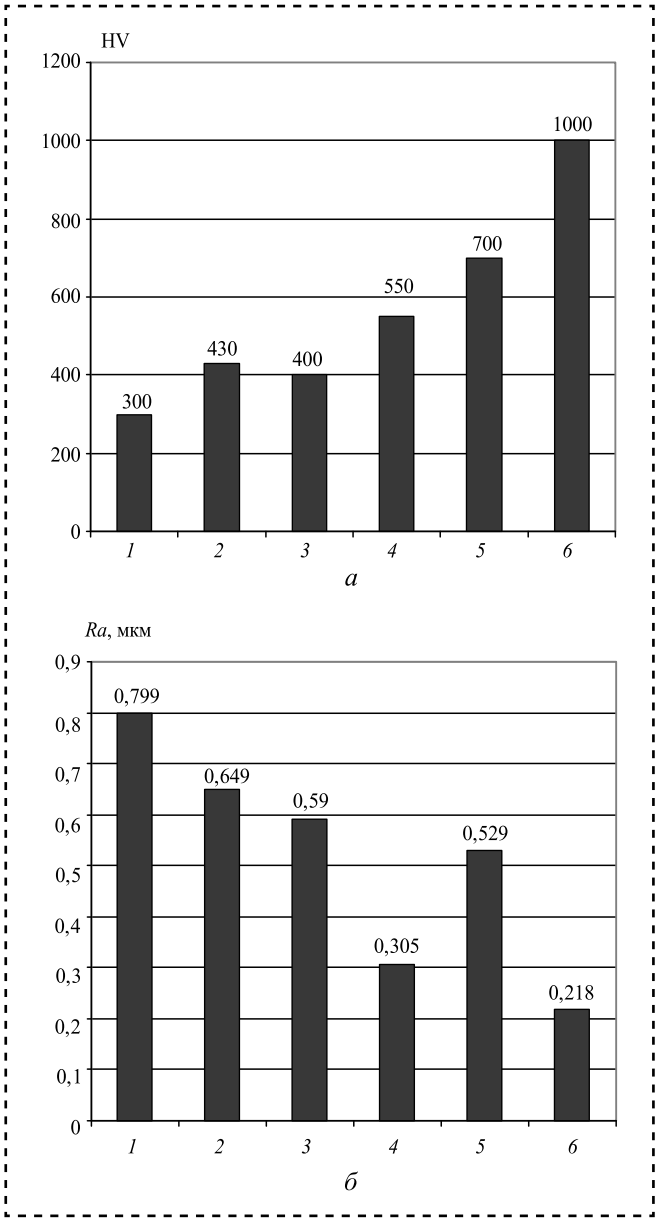


Рис. 3. Гистограмма изменения микротвердости HV (*а*) и параметра шероховатости *Ra* (*б*) в зависимости от метода механической обработки детали из стали 45:
1 — точение без термической обработки; *2* — точение + АВ; *3* — ТО + точение; *4* — ТО + АВ; *5* — точение + нанесение покрытия из хрома с УА; *6* — УА + точение + АВ

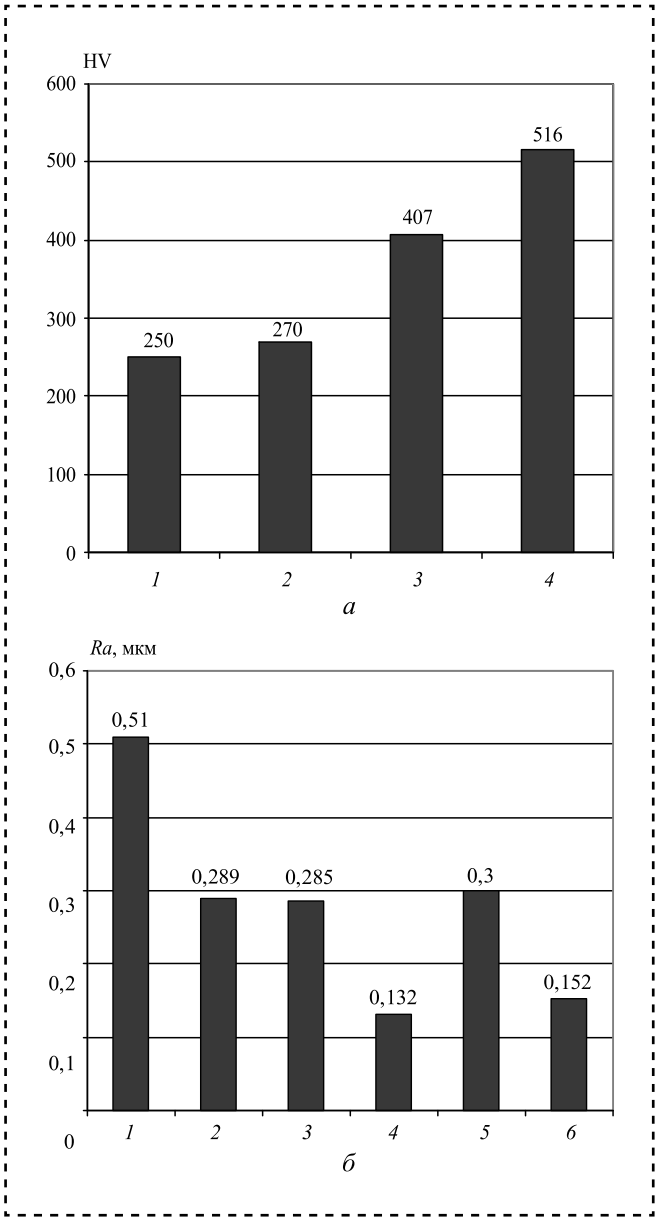


Рис. 4. Гистограмма изменения микротвердости HV (*а*) и параметра шероховатости *Ra* (*б*) в зависимости от метода отделочной обработки для детали из стали 12Х18Н10Т:
1 — точение; *2* — точение + АВ; *3* — точение + шлифование; *4* — точение + шлифование + АВ; *5* — шлифование + ТО; *6* — шлифование + ТО + АВ

АВ — 1000 HV. Параметр шероховатости *Ra* после точения, шлифования и последующего АВ уменьшается с 0,799 до 0,305 мкм, а после нанесения покрытия из хрома с УА и последующего АВ — до 0,208 мкм.

На рис. 4 показано изменение микротвердости HV и параметра шероховатости *Ra* в зависимости от метода обработки для деталей из стали 12Х18Н10Т. Исходная микротвердость для деталей, обработанных точением составляет 250 HV. Последующее АВ незначительно повышает эту величину. Для этих же деталей, подвергнутых ТО, наблюдали существенное увеличение микротвердости после АВ до 516 HV. Алмазное выглаживание деталей стали 12Х18Н10Т без ТО уменьшает параметр шероховатости до 0,132 мкм, а после ТО до 0,152 мкм.

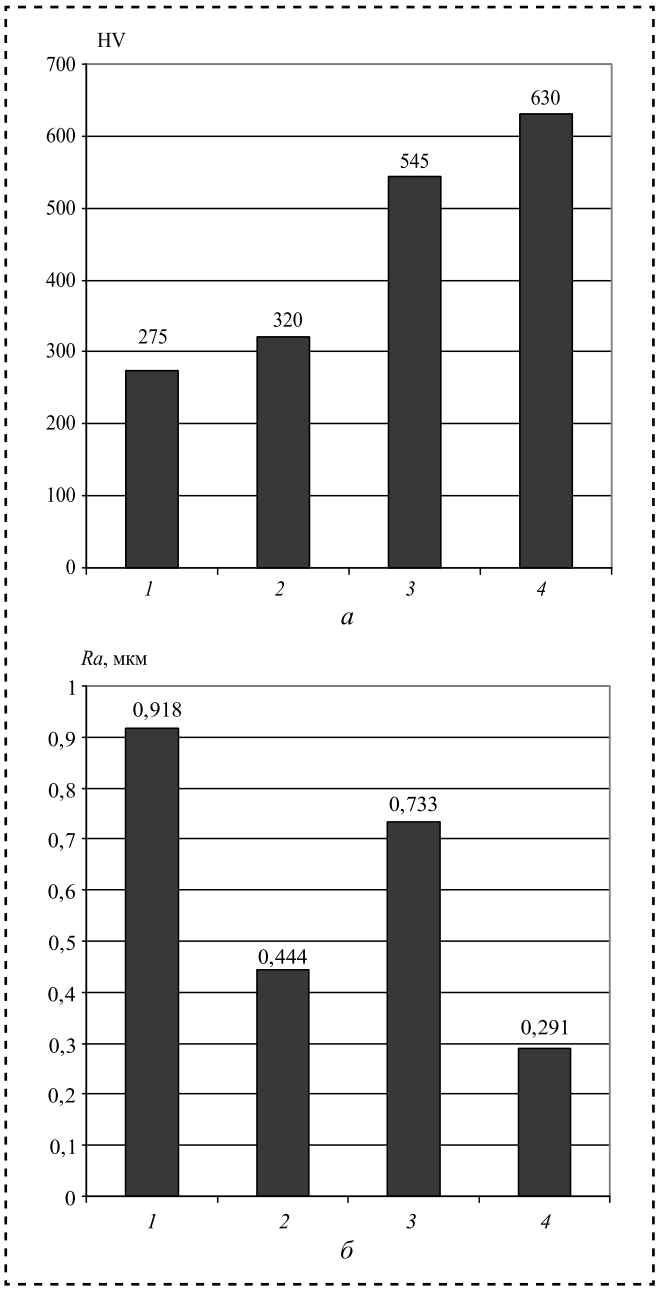


Рис. 5. Гистограмма изменения микротвердости HV (*а*) и параметра шероховатости *Ra* (*б*) в зависимости от метода отделочной обработки для детали из стали 40Х13:
1 — точение; *2* — точение + АВ; *3* — точение + шлифование; *4* — точение + шлифование + АВ

Термическая обработка и последующее АВ детали из стали 40Х13 существенно повышают микротвердость (рис. 5). Обработка АВ снижает параметр шероховатости после точения до 0,444 мкм, а после шлифования — до 0,291 мкм.

Модернизированная установка для испытания материалов трением представляет собой динамометр с индуктивными датчиками для измерения силы резания, смонтированном на токарном станке 16К20 (рис. 6). Державку *3* устанавливают в динамометр *5*. Контртело *8* (пруток сечением 10×10) изготовлено из серого чугуна, %: 3,0 C; 0,8 Mn; 1,4 Si; 0,1 P; ⩽ 0,15 S. Контактирующая с деталью поверхность *3* выполнена вогнутой цилиндрической в зависимости от диаметра исследуемой детали. Скорость вращения детали 100...200 мин$^{-1}$. Нагрузку на зону контакта (50...300 Н) фиксировали проторированным индикатором *4*. Во время испытаний измеряли силу трения и число оборотов детали (длину пути изнашивания). Через заданные промежутки времени и после износа изнашиваемые детали снимали с экспериментальной установки и поверхности износа фотографировали. Испытания на износ покрытий и поверхностей деталей проводили до достижения критической длины пути изнашивания деталей, необходимой для катастрофического разрушения хромовых покрытий и поверхностей деталей без покрытия [3—4].

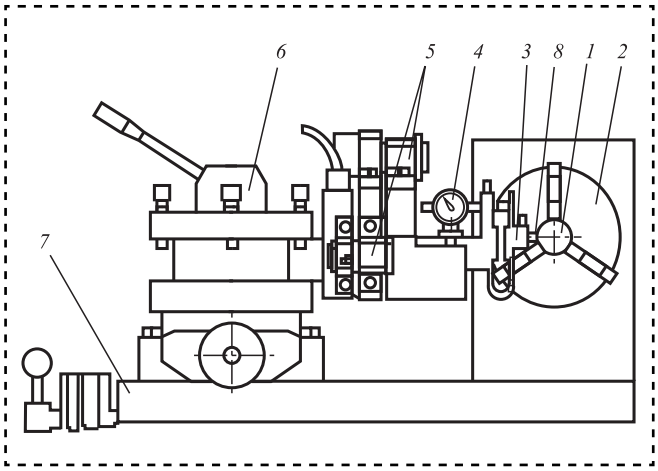


Рис. 6. Схема экспериментальной установки:
1 — образец; *2* — шпиндель станка; *3* — державка; *4* — стрелочный индикатор; *5* — динамометр; *6* — резцедержатель; *7* — салазки; *8* — контртело

На рис. 7 представлены гистограммы изменения длины пути изнашивания деталей из разных сталей в зависимости от метода упрочняющей обработки.

На рис. 8 показаны фотографии изнашивания поверхностей деталей с гальванопокрытием из хрома и УА. Исходная поверхность, покрытая хромом с УА, имеет выступы (рис. 8, *а*), а по-

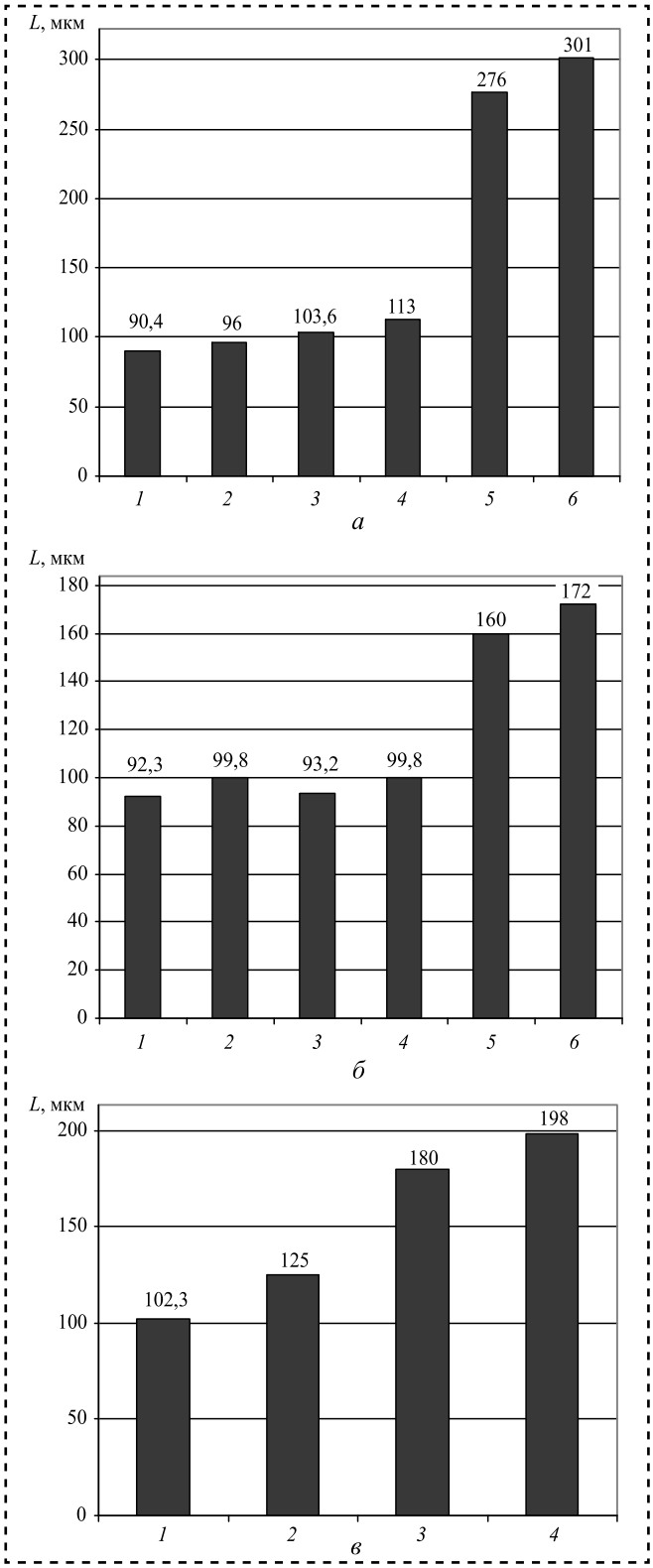


Рис. 7. Гистограммы изменения износа поверхностей деталей из сталей 45, 12Х18Н10Т и 40Х13:

а — сталь 45: *1* — (исходная) точение; *2* — точение + АВ; *3* — ТО; *4* — ТО + АВ; *5* — нанесение покрытия из хрома с УА; *6* — УА + АВ; *б* — сталь 12Х18Н10Т: *1* — точение; *2* — точение + АВ; *3* — шлифование; *4* — шлифование + АВ; *5* — ТО; *6* — ТО + АВ; *в* — сталь 40Х13: *1* — точение; *2* — точение + АВ; *3* — ТО; *4* — ТО + АВ

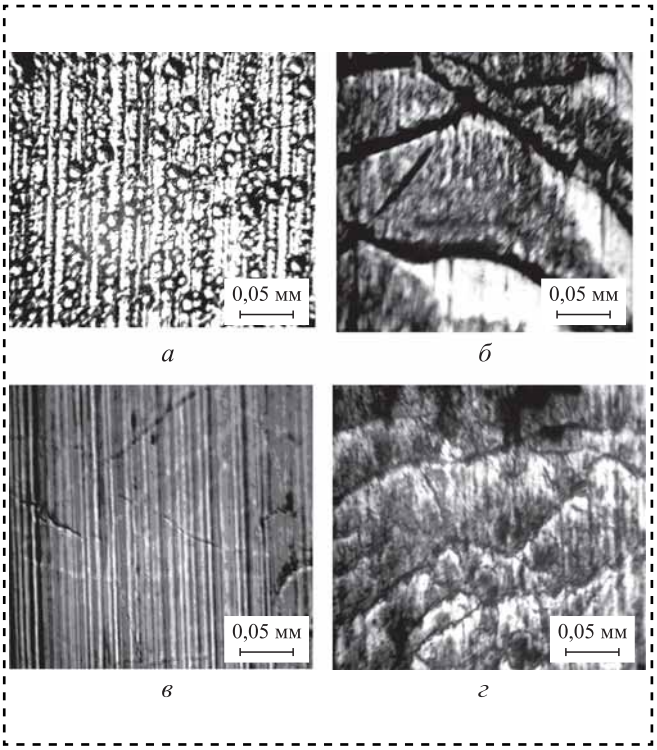


Рис. 8. Микрофотографии износа поверхности детали из стали 45:

а — исходное состояние после гальванопокрытия из хрома с УА после точения; *б* — после износа; *в* — исходное состояние после точения и последующего АВ гальванопокрытия из хрома с УА; *г* — после износа

сле обработки АВ этих выступов нет (рис. 8, *в*), так как они вдавлены в поверхность. Изнашивание приводит вначале к локальному разрушению покрытия, а затем к общему его разрушению на основе усталостного механизма. Алмазное выглаживание гальванопокрытия "залечивает", т.е. заглаживает исходные трещины, образовавшиеся после электроосаждения (рис. 8, *г*). Поэтому новые трещины образуются на более поздней стадии изнашивания [5].

Выводы

Исследования механических свойств деталей после точения, шлифования, алмазного выглаживания и нанесения покрытия показали возможность замены дорогостоящих сталей 40Х13 и 12Х18Н10Т на более дешевую сталь 45 с покрытием из хрома с ультраалмазами.

Отработка деталей из сталей 45, 12Х18Н10Т, 40Х13 как по отдельности точением, алмазным выглаживанием, нанесением покрытий из ультра-

алмазов, так и комбинированным способом, увеличила изностойкость деталей во всех случаях. Однако наиболее предпочтительно комбинированное упрочнение деталей из более дешевой стали 45.

Библиографический список

1. **Самок Г.С., Полетаев В.А.** Повышение долговечности деталей электронасосов путем нанесения специальных покрытий: сб. трудов // Физика, химия и механика трибосистем. Вып. 3. Иваново: ИвГУ. 2004. С. 120—122.
2. **Полетаев В.А., Самок Г.С., Королькова Г.С.** Исследование механических свойств деталей электронасосов, упрочненных комбинированным способом // Вестник ИГЭУ. 2008. Вып. 3. С. 22—25.
3. **Полетаев В.А., Самок Г.С., Королькова Г.С.** Исследование деталей электронасосов, упрочненных комбинированным способом, на износостойкость // Вестник ИГЭУ. 2009. Вып. 3. С. 14—17.
4. **Самок Г.С., Королькова Г.С.** Влияние метода упрочняющей обработки на качество поверхностного слоя деталей машин // Вестник ИГЭУ. 2011. Вып. 1. С. 57—61.
5. **Полетаев В.А., Егорычева Е.В.** Исследование характеристик поверхностного слоя деталей электронасосов // Наука и мир. 2014. № 10. Т. 1. С. 50—55.

УДК 621.891:519.28

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

Оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в условиях вакуума на основе термокорреляционных зависимостей

Для условий вакуума разработаны методики оценки долговечности и антифрикционных характеристик пар трения с твердосмазочными покрытиями (ТСП) на основе использования универсальных зависимостей температуры трения от контактного давления и скорости скольжения. Получены универсальные зависимости $T_{тр} = f(p, v)$ применительно к парам трения с ТСП для широкого диапазона изменений нагрузочно-скоростных факторов, а также рассчитаны соответствующие термокорреляционные зависимости для условий вакуума для пар трения с ТСП различных составов. На примере пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 показана возможность корректировки полученных термокорреляционых зависимостей $\tau = f(T_{тр})$ и $f_{тр} = f(T_{тр})$ с учетом экспериментальных данных других исследователей для расширения температурных диапазонов их применения.

Durability assessment techniques and antifrictional characteristics are developed for conditions of vacuum steam of friction with solid lubricating coating (SLC) on the basis of use of universal dependences of temperature of friction from the contact pressure and speed of sliding. For the purpose of realization of the offered techniques universal dependences $T_{tr} = f(p, v)$ in relation to couples of friction with SLC for the wide range of changes of load and high-speed factors, and also the corresponding thermocorrelation dependences for vacuum conditions for couples of friction with TSP of various structures are calculated. For example of couple of friction with SLC VNII NP 212 possibility of adjustment received the termocorrelation of dependences $\tau = f(T_{tr})$ is shown and $f_{tr} = f(T_{tr})$ taking into account experimental data of other researchers for expansion of temperature ranges of their application.

Ключевые слова: твердосмазочные покрытия, условия вакуума, долговечность, коэффициент трения.

Keywords: solid lubricating coatings, vacuum conditions, durability, friction coefficient.

Для узлов трения, функционирующих в условиях вакуума, радиационного излучения, при повышенной и пониженной температуре применяют композиционные твердосмазочные покрытия (ТСП) со связующими веществами на основе антифрикционных наполнителей.

Расчет параметров работоспособности для указанных фрикционных сопряжений затруднен вследствие отсутствия комплексных зависимостей, позволяющих оценивать ресурс и антифрикционные свойства для произвольного сочетания нагрузочно-скоростных факторов при заданной температуре эксплуатации. Решение данной задачи и является целью данной работы.

Прогнозирование долговечности пар трения с ТСП

Исследования основных параметров работоспособности узлов трения с ТСП проводили с использованием математического планирования экспериментов по методу центрального композиционного ротатабельного униформ-планирования (ЦКРУП) 2-го порядка на стенде для изучения трения и износа в вакууме (рис. 1), созданного на базе модернизированной роликовой машины трения, позволяющей бесступенчато изменять нагрузочно-скоростные режимы трения с возможностью непрерывной записи коэффициента $f_{тр}$ и температуры трения $T_{тр}$ [1].

Исследовали ТСП ВНИИ НП 212. Диапазоны варьирования факторов в планируемом эксперименте в условиях вакуума: v = 0,087...0,504 м/с; p = 61...121 МПа.

Экспериментальными исследованиями, проведенными в условиях вакуума [1], подтверждено определяющее влияние температурного фактора на долговечность рассматриваемых пар трения с ТСП (рис. 2).

Для оценки долговечности рассматриваемых фрикционных сопряжений (см. рис. 1)

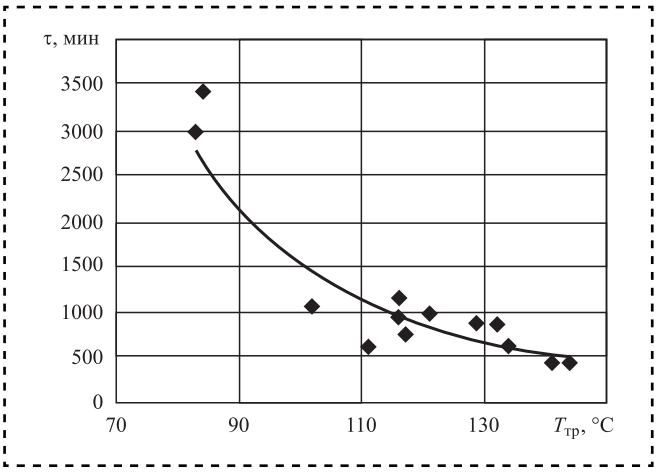


Рис. 2. Зависимость долговечности пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 в вакууме от температуры трения (для различных сочетаний контактного давления *p* и скорости скольжения v)

получена следующая термокорреляционная зависимость:

$$\tau = 4 \cdot 10^9 T_{тр}^{-3,206}, \quad (1)$$

где τ — долговечность, мин;

$T_{тр}$ — температура трения, °С.

Для пар с ТСП ВНИИ НП 229 определена зависимость [2]:

$$\tau = 232\ 151 T^{-1,321}. \quad (2)$$

Так как температура трения $T_{тр}$ является функцией эксплуатационных факторов контактного давления p и скорости скольжения v, для расчета долговечности τ пар трения с ТСП необходимо иметь термокорреляционные зависимости типа $T_{тр} = f(p, v)$, позволяющие оценить температуру трения для произвольного сочетания нагрузочно-скоростных параметров. В этом случае алгоритм оценки долговечности пар трения с ТСП может быть записан в виде, представленном на рис. 3.

Получена искомая термокорреляционная зависимость для пары с ТСП ВНИИ НП 212 в условиях вакуума для диапазонов изменения p = 61...121 МПа, v = 0,087...0,504 м/с:

$$T_{тр} = 3,31 + 291,64v + 0,643p_{конт} - 282,19v^2. \quad (3)$$

Найденную для пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 по схеме "вал — втулка" для диапазона

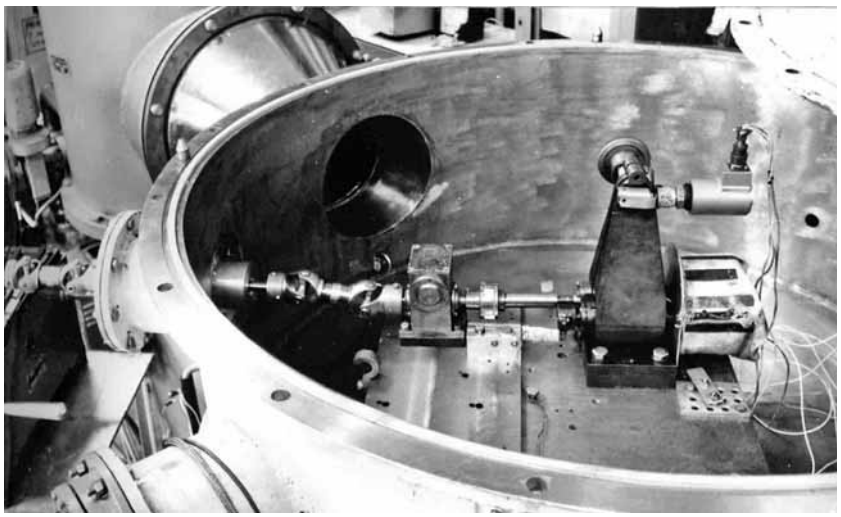


Рис. 1. Компоновка нагрузочно-измерительного механизма стенда для изучения трения и износа в вакууме

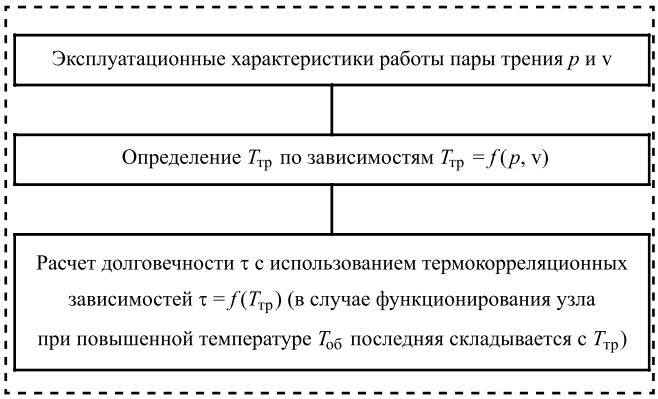


Рис. 3. Алгоритм расчета долговечности пар трения с композиционными ТСП со связующими веществами

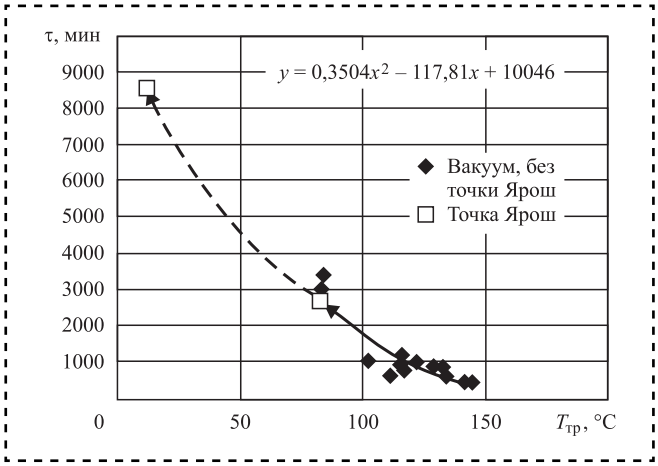


Рис. 4. Графическая интерпретация корректировки термокорреляционной зависимости $\tau = f(T_{тр})$ пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 с учетом литературных данных [3] для условий вакуума

$\Delta T_{тр}$ = 83...144 °C термокорреляционную зависимость (1) можно уточнять с учетом литературных данных [3]. Например, для условий космического вакуума температура трения по формуле (3) составила $T_{тр}$ = 11,93 °C (принимая условие выхода за расчетные границы контактного давления $p_{конт}$ = 9,8 МПа и скорости скольжения v = 0,008 м/с), что обеспечило долговечность τ = 143 ч = 8580 мин (рис. 4).

С учетом этого результата термокорреляционная зависимость $\tau = f(T_{тр})$ (1) для ТСП ВНИИ НП 212 при $\Delta T_{тр}$ = 12...144 °C приняла вид:

$$\tau = 0,3504T_{тр}^2 - 117,81T_{тр} + 10\,046. \qquad (4)$$

Прогнозирование антифрикционных свойств пар трения с ТСП

В результате проведения экспериментальных исследований в вакууме установлена корреляционная зависимость антифрикционных характе-

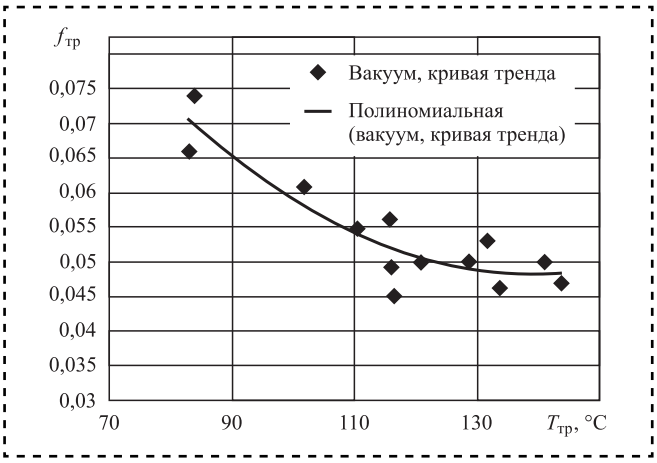


Рис. 5. Термокорреляционная зависимость $f_{тр} = f(T_{тр})$ для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 для условий вакуума

ристик рассматриваемых фрикционных сопряжений от температуры трения (рис. 5) [1].

Для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 рассчитана корреляционная зависимость $f_{тр} = f(T_{тр})$, описываемая уравнением:

$$F_{тр} = 7\cdot10^{-6}T_{тр}^2 - 0,002T_{тр} + 0,190. \qquad (5)$$

Алгоритм расчета коэффициента трения для рассматриваемых пар с ТСП с учетом полученной ранее зависимости $T_{тр} = f(p, v)$ (3) представлен на рис. 6.

Для оценки антифрикционных характеристик пар трения с ТСП различных составов, функционирующих в условиях вакуума, искомые термокорреляционные зависимости $f_{тр} = f(T_{тр})$ построены с использованием экспериментальных данных, приведенных в работе [4] (таблица).

Найденную для пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 по схеме "вал — втулка" для диапазона $\Delta T_{тр}$ = 83...144 °C термокорреляционную зависи-

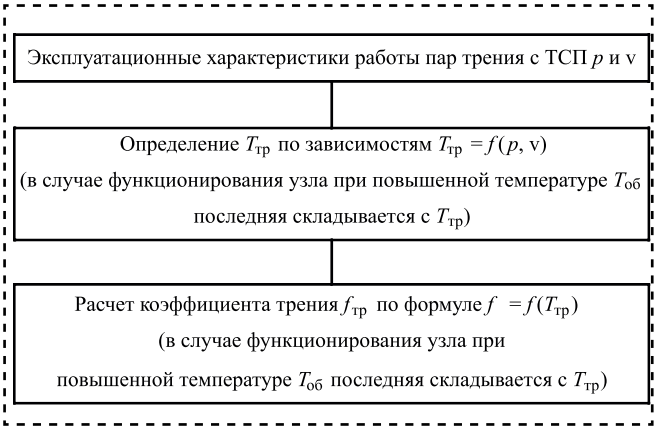


Рис. 6. Алгоритм расчета коэффициента трения пар с ТСП

Термокорреляционные зависимости $f_{тр} = f(T_{тр})$ для пар трения с ТСП различных составов, функционирующих в условиях вакуума

Тип ТСП	Состав	Корреляционные зависимости $F_{тр} = f(T_{тр})$
ВНИИ НП 212 (данные автора)	MoS_2 + мочевино-формальдегидная смола	$f_{тр} = 7\cdot10^{-6}T_{тр}^2 + 0{,}002T_{тр} + 0{,}190$
ВНИИ НП 213 [4]	MoS_2 + кремнийорганическое связующее К-55	$f_{тр} = 0{,}0905 - 3{,}46\cdot10^{-4}T_{тр} + 5{,}86\cdot10^{-7}T_{тр}^2$
ЦВСП-3с [4]	Графит + кремнийорганическое связующее К-55	$f_{тр} = 0{,}152 - 5{,}23\cdot10^{-4}T_{тр} + 5{,}6\cdot10^{-7}T_{тр}^2$
ТСП [4]	Графит + силикат натрия	$f_{тр} = 0{,}1167 - 3{,}99\cdot10^{-4}T_{тр} + 4{,}23\cdot10^{-7}T_{тр}^2$

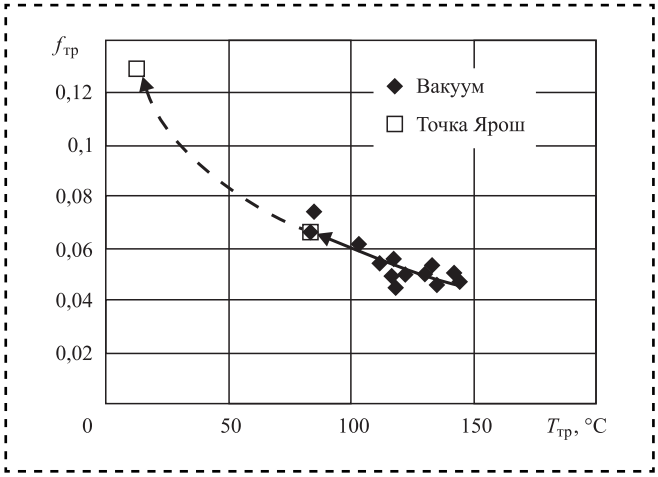


Рис. 7. Графическая интерпретация корректировки термокорреляционной зависимости $f_{тр} = f(T_{тр})$ для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 с учетом литературных данных [3]

мость $f_{тр} = f(T_{тр})$ (5) можно уточнять с учетом литературных данных: p = 9,8 МПа; v = 0,008 м/с; $f_{тр}$ = 0,13. Например, для условий космического вакуума проведена корректировки термокорреляционной зависимости (5), графическая интерпретация которой представлена на рис. 7. Расчетные значения: $T_{тр}$ = 11,93 °С; $f_{тр}$ = 0,138.

С учетом этого результата термокорреляционная зависимость для пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 при $\Delta T_{тр}$ = 12...144 °С приняла вид:

$$f_{тр} = 0{,}381T_{тр}^{-0{,}41}. \quad (6)$$

Заключение

1. Разработана методика оценки долговечности антифрикционных свойств для пар трения с ТСП в условиях вакуума на основе использования универсальных зависимостей температуры трения от нагрузочно-скоростных параметров работы узла $T_{тр} = f(p, v)$ и корреляционных функций зависимостей долговечности от температуры трения $\tau = f(T_{тр})$ для ТСП различных составов. Для реализации методики получены универсальные зависимости $T_{тр} = f(p, v)$ применительно к парам трения с ТСП различных составов и схем трения для широкого диапазона изменений нагрузочно-скоростных факторов. Рассчитаны корреляционные зависимости типа $\tau = f(T_{тр})$ для условий вакуума для пар трения с ТСП ВНИИ НП 212, 229, а также типа $f_{тр} = f(T_{тр})$ для условий вакуума для пар трения с ТСП ВНИИ НП 212, ТСП на основе MoS_2, графита с кремнийорганическим связующим К-55 и графита со связующим Na_2SiO_3.

2. На примере пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 показана возможность корректировки полученных термокорреляционых зависимостей $\tau = f(T_{тр})$ и $f_{тр} = f(T_{тр})$ с учетом экспериментальных данных других исследователей для расширения температурных диапазонов их применения.

Библиографический список

1. **Хопин П.Н.** Работоспособность твердосмазочных покрытий в различных условиях. Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 179 с.

2. **Ермаков А.Т., Матвеевский Р.М.** Исследование работоспособности некоторых твердых смазочных покрытий при трении в вакууме и высоких температурах // Твердые смазочные покрытия. М.: Наука, 1977. С. 70—74.

3. **Ярош В.М., Моишеев А.А., Броновец М.А.** Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве на орбите вокруг Луны // Трение и износ. 2003. № 6. С. 626—635.

4. **Сентюрихина Л.Н., Опарина Е.М.** Твердые дисульфид-молибденовые смазки. М.: Химия, 1966. 152 с.

УДК 539.3

А.А. Шмидт, И.М. Володин, *д-р техн. наук*
(Липецкий государственный технический университет)
E-mail: me@alexschmidt.net

Подбор смазки с учетом коэффициента трения для вытяжки деталей из высокопрочной стали

Исследовано влияние условий смазывания на формоизменение в процессе листовой штамповки деталей из высокопрочной стали. Рассмотрены особенности выбора смазки при глубокой вытяжке. Разработаны методика и экспертный модуль для оптимизации выбора смазки с учетом ее стоимости и параметров детали. Проанализирована возможность вытяжки на примере автомобильных деталей.

Investigated how lubricant affects the stamping of the part from AHSS. Conducted the selection of the lubricants for successful deep drawing of parts and methodology and the expert module was developed with respect to costs of the lubricants and parameters of the stamped part. In this study the automotive parts stamping was further investigated by demonstrating the usage of analysis to conduct experiments and performed the research based on the mathematical model built using statistical analysis.

Ключевые слова: деформация высокопрочных сталей, оптимизация выбора смазки, коэффициент трения.

Keywords: high-strength steel stamping, optimization of lubricant choice, friction coefficient.

Цель работы — разработка методики оценки экономичности использования и подбора смазок, обеспечивающих лучшие условия трения, в зависимости от коэффициента трения между инструментом и деформируемой деталью и экспертного модуля подбора из группы смазок для глубокой вытяжки с учетом особенностей деталей из высокопрочных сталей (AHSS) и стоимости смазки.

Подбор смазок труден из-за их многообразия, ограниченного анализа стоимости смазки по отношению к стоимости детали, в случае AHSS сталей — необходимости точного подбора смазок из-за высоких напряжений в различных областях заготовки, зависимости качества поверхности готовой детали от смазки, состояния инструмента и других параметров [1—6].

Методика подбора смазки с учетом стоимости изготовления детали

Использовали методы статистики и математического анализа технологических параметров вытяжки и напряжений для различных видов смазок. Напряжения при вытяжке с применением смазки рассчитывали по формуле Бойдена и Табора [7]:

$$\tau_f = a\tau_a + (1-a)\tau_b,$$

где a — относительная площадь контакта;

τ_a — среднее напряжение сдвиговой деформации на вершинах контакта;

τ_b — среднее напряжение сдвиговой деформации в области углубления заполнения смазки.

Формула учитывает все основные параметры контактной поверхности и параметры смазки: вязкость, давление, скорость сдвига и толщину смазки.

Оценку расхода смазки (в среднем 5...40 мкм) выполняли по формуле [8]:

$$h = \frac{p_2 - p_1}{0,1\rho F},$$

где h — толщина смазки;

p_2 — толщина пластины металла со смазкой;

p_1 — толщина пластины металла без смазки;

F — площадь заготовки;

ρ — средняя плотность смазки.

Тогда требуемая масса смазки:

$$m_s = 0,1h\rho F.$$

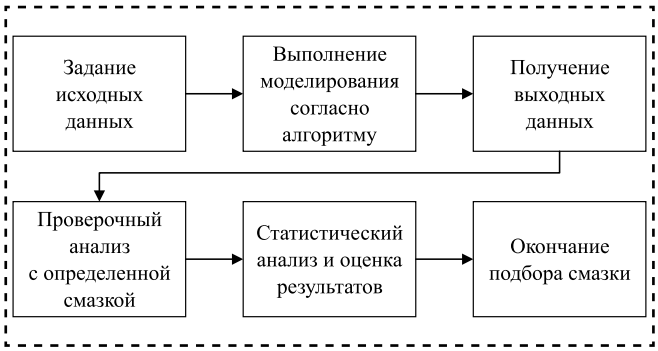


Рис. 1. Методика определения оптимальной смазки для вытяжки металла

Методика нахождения оптимальной смазки (коэффициента трения) состоит из нескольких шагов (рис. 1).

1. Задаем исходный материал с определенным предельным напряжением σ_t.

2. Определяем коэффициент трения для нормальных условий.

3. Моделируем вытяжку детали, находим исходную форму заготовки.

4. Для заданной исходной формы заготовки оцениваем стоимость смазки в зависимости от требуемого количества.

5. Проверяем зависимости между полученными значениями и факторами.

6. Находим минимальную стоимость (оптимизационный параметр) для заданной исходной формы и требуемых параметров смазки (коэффициента трения).

Разработали экспертный модуль для выполнения методики нахождения оптимальной смазки. Найденная позиция (тип) смазки и будет являться минимальной по стоимости.

Для оценки влияния смазки на результаты вытяжки использовали методы статистического анализа, также выполнили однофакторный дисперсионный анализ зависимости возникающих в заготовке напряжений от коэффициента трения [9].

Выбор оптимальной смазки оценивали по влиянию коэффициента трения заготовки на результаты формоизменения экспериментальным сравнением нескольких видов смазки технологического оборудования. Использовали метод пробного деформирования с вычислением показателей сил трения (учитывали примененную смазку и размеры контура полученной заготовки). При совпадении моделируемого и экспериментального контуров заготовки соотносили коэффициент трения и фактическую смазку и находили коэффициент трения заданной смазки.

Исследовали различные виды смазки отечественного (9 наименований) и зарубежного (23 наименования) производства (таблица).

Моделирование с использованием метода конечных элементов и анализ возможности вытяжки

Моделировали вытяжку детали усиления бампера с повышенными требованиями к качеству поверхности (рис. 2).

Влияние технологических факторов на процессы штамповки показано на основе анализа результатов оптимизации заготовки вытягиваемой детали. Для детали усиления бампера кузова автомобиля при заданном коэффициенте трения рассчитывали максимальные напряжения в заготовке, отклонения толщины и силы на пуансоне. Заданная толщина нанесения слоя смазки 5...40 мкм. Характеристики металла: высокопрочная сталь AHSS, $\sigma_в$ = 590 МПа.

Выполнили математическое моделирование вытяжки деталей с различными параметрами смазки (коэффициентом трения). По результатам моделирования оценивали эффективность выбранной смазки. При изменении нормального давления прижима от 20 до 60 МПа и скорости деформирования от 6 до 16 мм/с при исследуемых типах смазок изменение качественного характера для коэффициента трения сохранилось.

Раскрой металла выполняли согласно методике, приведенной в работе [9]. Анализировали толщины заготовки после деформации и максимальные напряжения, возникающие в детали

Рис. 2. Исследуемая деталь:
а — усиление бампера; *б* — промышленный образец

Стоимость исследованных смазок

Код	Марка	Тип смазки	Стоимость	Пропорция
Зарубежные смазки				
L1	FUCHS PETROLUB AG (MS Fluid)	Синтетическая	$13.50	1:1
L2			$23.85	
L3			$19.10	
L4			$15.85	
L5	Quaker	Водоэмульсионная	$17.73	9:1
L6			$8.89	1:1
L7		Масляная	$13.99	
L8			$14.32	
W1	Parker	Водоэмульсионная	Дог.	
W2				
W3	Daubert			
L9				
L10	Tower Oil	Синтетическая	$19.21	4:1
L11			$16.68	
L12			$20.33	
L13			$16.33	
L14	Irmco	Водоэмульсионная	Дог.	1:1
L15				2:1
L16	Houghton Intl.		$19.69	3:1
L17			$15.86	1:1
L18			$6.68	
Отечественные смазки				
R1	ОГВ-75	Водно-графитовая	92 руб/кг	1:1
R2	"Графитол"	Термостойкая	150 руб/кг	
R3	"Росойл-ШОК"	Масляная	48,5 руб/кг	
R4	"Агринол ШС-2"	Для особо глубокой вытяжки	280 руб/кг	
R5	"Бентол-3 марка ЛПД-1/А"	Водоэмульсионная (полужидкая без наполнителя)	95 руб/кг	
R6	"Росойл-222"	Масляная (для глубокой вытяжки)	403 руб/кг	
R7	"Росойл-СН-М"	Масляная (тяжелая холодная штамповка)	Дог.	
R8	"Росойл-503"	Водосмешиваемая СОЖ для штамповки	544 руб/кг	
R9	"Росойл-555(М)"	Для штамповки из легированных и углеродистых сталей	831 руб/кг	4:1

Рис. 4. Зависимость максимального напряжения в процессе моделирования вытяжки для различных смазок (коэффициентов трения) в усилении бампера

в характеристических областях в зависимости от коэффициента трения.

Ввиду чрезмерного трения заготовки об инструмент возникает нарушение сплошности.

Распределение деформаций зависит от близости к центру пластических деформаций и коэффициента трения и имеет прямую зависимость от указанных параметров, т.е. сплошность заготовки тем ниже, чем больше сила трения, и тем больше роль внутризеренного деформирования и ниже роль межзеренного. При низком уровне трения понижается структурная неоднородность металла, что оказывает влияние на качество и зернистость металла.

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента трения и напряжения, возникающего в заготовке, в зависимости от ее профиля в областях с повышенной деформацией. Указанное сравнение выполнено для оптимизированной заготовки.

На основе полученной зависимости максимальных напряжений в различных областях заготовки можно сделать вывод, что наиболее подходящей является смазка, при которой получен коэффициент трения 0,13. Из экспертного модуля получается, что из отечественных наиболее подходящей является смазка "Росойл-ШОК" R3, из зарубежных — Houghton Intl. L18.

Вывод

Выполнен отбор смазок, подходящих для вытяжки высокопрочной стали. Проведена статистическая оценка влияния коэффициента трения смазки на напряжения в заготовке. Согласно предложенной методике разработан экспертный модуль, который опробован при моделировании деталей автомобильного производства. Методика может быть внедрена в компьютерные системы для моделирования технологических процессов вытяжки.

Библиографический список

1. **Hyunok K., Taylan A., Quingguang Y.** Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steels (AHSS) using deep drawing and ironing tests // Journal of Materials Processing Technology. Vol. 209. No. 8, 21. 2009. P. 4122—4133.

2. **Keeler S., Kimchi M.** Advanced High Strength Steels Application Guidelines V5.0 // 5th ed. WorldAutoSteel. 2014. 88 p.

3. **Ingarao G., Lorenzo R.D., Micari F.** Analysis of stamping performances of dual phase steels: A multi-objective approach to reduce springback and thinning failure // Materials & Design. Vol. 30. No. 10. 2009. P. 4421—4433.

4. **A study** on variable friction model in sheet metal forming with advanced high strength steels / W. Wurong // Tribology International. Vol. 93. Part A. 2016. P. 17—28.

5. **Die** wear in stamping of advanced high strength steels — Investigations onthe effects of substrate material and hard-coatings / O.N. Coraa // Tribology International. Vol. 52. 2012. P. 50—60.

6. **Pradeep L., Kishore M., Kailas S.V.** Studies on Friction in an Iron-Steel Tribo-System Under Dry and Lubricated Conditions // Materials And Manufacturing Processes. Vol. 23. No. 7. 2008.

7. **Dowson D.** History of Tribology // Professional Engineering Publishing, 1997.

8. **ГОСТ 9.054—75.** Консервационные масла, смазки и нефтяные тонкопленочные покрытия. М.: Изд-во стандартов, 1975. 12 с.

9. **Володин И.М.** Статистический анализ результатов экспериментальных исследований в обработке металлов давлением: учеб. пособие. Липецк: Изд-во ЛГТУ. 2003. 105 с.

10. **Степанов М.Н., Шаврин А.В.** Статистические методы анализа механических свойств. М.: Машиностроение, 2005. 398 с.

УДК 621.892

А.Ф. Денисенко, *д-р техн. наук,* **Н.С. Назаров**
(Самарский государственный технический университет)
E-mail: ask@samgtu.ru

Формирование регрессионной модели контактного термического сопротивления плоских соединений шпиндельных узлов

Разработана регрессионная модель контактного термического сопротивления в соединениях шпиндельного узла, позволяющая учесть связь технологии обработки и физико-механические свойства поверхностей с фактической и контурной площадью контакта. Рассмотрено определение фактической и контурной площади контакта на стадии проектирования шпиндельных узлов.

The regression model with the contact thermal resistance in the compounds of the spindle assembly allowing for the connection of processing technology and the physical and mechanical properties of surfaces with the actual contact area and contour is developed. The definition of the actual contact area and contour at the design stage spindle assemblies is considered.

Ключевые слова: контактное термическое сопротивление, шпиндельный узел, теплопроводность, регрессионный анализ, контурная площадь контакта, фактическая площадь контакта.

Keywords: contact thermal resistance, spindle assembly, heat conductivity, regression analysis, contour contact area, actual area of contact.

Интенсификация процессов металлообработки в современном машиностроении, естественным следствием которых является увеличение тепловыделения в технологических системах, возрастающие требования к точности обработки, наличие возможностей снижения геометрических, упругих, динамических и других погрешностей обработки, ставит тепловые процессы в ряд решающих факторов, определяющих качество выпускаемой продукции. Особенно заметно их влияние при выполнении чистовых операций, когда роль силовых упругих деформаций элементов технологической системы станка снижается [1].

Характер формирования тепловых деформаций для каждой подсистемы станка имеет свои особенности, связанные с конструкцией и компоновкой сборочных единиц станка, теплофизических характеристик материалов, из которых они изготовлены, условий теплообмена, мощности тепловыделений в источниках тепла и т.д. [1].

Шпиндельные узлы (ШУ) металлообрабатывающего оборудования — наиболее ответственные подсистемы металлорежущих станков, в первую очередь определяющие качество обрабатываемых деталей.

Тепловые потоки в ШУ имеют весьма сложный характер в связи со значительным количеством источников тепла, а также большим числом деталей, входящих в ШУ.

Формирование тепловых потоков в ШУ определяется не только распространением тепла от источников через сплошные детали, но, в первую очередь, через контакты деталей между собой.

Прохождение теплового потока через контактирующие поверхности деталей отличается от его движения через сплошной материал, так как в реальных стыках отсутствует идеальный контакт по всей поверхности: на поверхностях машин всегда имеются неровности в виде макроотклонений, волнистости и шероховатости,

зависящие от структуры материала и характера технологической обработки.

Рассмотрим подробнее контакт двух поверхностей.

При соединении твердых тел из-за погрешностей формы, расположения, волнистости и шероховатости на значительной части номинальной площади контакта не происходит непосредственного взаимодействия микровыступов.

Отклонения геометрической формы и взаимного расположения контактирующих поверхностей приводит к образованию макрозон соединения, площадь которых близка к площади номинальной поверхности (номинальная площадь при наличии макроотклонений).

Волнистость поверхности приводит к тому, что первостепенно в контакт вступают выступы, расположенные на вершинах волн, причем вначале контакт произойдет по вершинам, которые располагаются друг против друга, и сумма высот — наибольшая. С увеличением нагрузки контактирующие пятна деформируются, при этом в контакт вступают новые пары выступов и волн. Волны деформируются упруго, а вершины выступов упруго, упругопластически и пластически. Контактирующие выступы будут группироваться на вершинах волн в отдельных зонах, совокупность которых составляет контурную площадь A_c. Контурная площадь уже в значительно большей степени, чем номинальная, связана с площадью, на которой непосредственно взаимодействуют контактирующие тела. Так, при грубых методах измерения (например, с помощью краски) определяют именно контурную площадь контакта [2].

Для металлов контурная площадь обычно составляет 5...10 % от номинальной, а фактическая 0,01...0,1 % от номинальной [2, 3].

Введение в рассмотрение при контактировании номинальной A_a, номинальной с учетом макроотклонений $A_{aм}$, контурной A_c и фактической A_r площадей контакта позволяет определять термическое контактное сопротивление как процесс последовательного многократного стягивания тепловых потоков от площади A_a к площади $A_{aм}$, от площади $A_{aм}$ к площади A_c и от площади A_c к площади A_r (рис. 1).

Необходимость учета значительного числа факторов, формирующих геометрическую картину контакта, делает перспективным для определения контактного термического сопротивления соединений применение регрессионного анализа с варьируемыми параметрами:

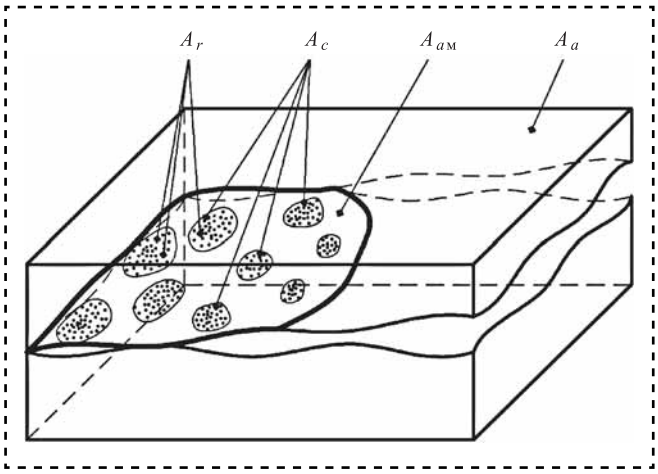


Рис. 1. Номинальная A_a, номинальная с учетом макроотклонений $A_{aм}$, контурная A_c и фактическая A_r площади контакта

— номинальным давлением p_a, определяемым отношением нагрузки на стык N к номинальной площади контакта A_a;

— параметром шероховатости стыка Ra, определяемым суммой параметров шероховатости первой Ra_1 и второй Ra_2 поверхности контакта;

— высотой межконтактного зазора $H = Rz_1 + Rz_2$, где Rz_1 и Rz_2 — максимальные высоты неровностей первой и второй поверхностей;

— высотой волнистости стыка Wz, определяемой суммой параметров высоты волнистости первой Wz_1 и второй Wz_2 поверхностей контакта;

— удельной теплопроводности материалов λ пары контактирующих поверхностей;

— теплопроводностью среды в межконтактном зазоре λ_c.

Для построения области варьирования переменных параметров рассмотрены плоские стыки ШУ координатно-расточных станков (рис. 2).

Для определения нагрузки на стык и, соответственно, номинального давления необходимо учесть особенности конструкции ШУ. В рассматриваемом ШУ (см. рис. 2) опоры шпинделя — радиально-упорные подшипники, которые должны иметь предварительный натяг, т.е. постоянную дополнительную нагрузку тел качения. Для внутренних колец подшипников натяг создают гайкой *12* (см. рис. 2) с резьбой М64×2. По техническим условиям сборки ШУ гайку *12* закручивают моментом 14 Н·м. Осевую силу на резьбе можно найти через радиальную силу на

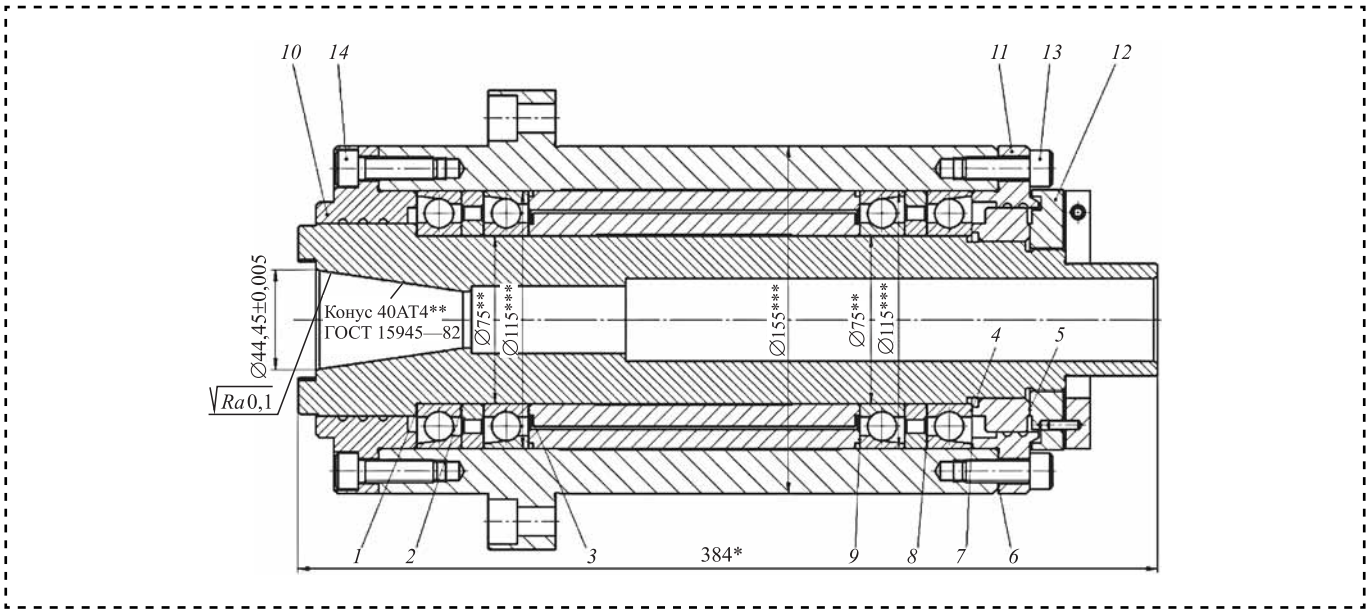


Рис. 2. Шпиндельный узел координатно-расточного станка СКР 400

среднем диаметре резьбы. Тогда нагрузка на стыки *1—5* составит 4050 Н. Наружные кольца подшипников стягивают деталями *10*, *11* и винтами *13*, *14*. Технология сборки предусматривает подшлифовку торцовой поверхности детали *10*, поэтому принимаем силу на стыки *6—9*, равную 4050 Н.

Из конструкции ШУ видно, что большинство контактов имеют кольцевую форму, поэтому номинальную площадь находим по выражению:

$$A_a = 0,25\pi\left(D_i - d_i\right),$$

где D_i и d_i — наибольшие и наименьшие диаметры кольцевого контакта.

Параметры шероховатости Ra_1, Ra_2 и Rz_1, Rz_2 назначают при проектировании узла в соответствии с ГОСТ 2789—73.

В качестве параметров высот волнистости Wz_1 и Wz_2 можно взять конкретные измеренные значения контактирующих поверхностей или воспользоваться обобщенными данными для поверхностей деталей машин при механических методах их обработки [4].

Большинство деталей ШУ изготавливают из углеродистых сталей. Чугун используют в основном для корпусных деталей.

Межконтактная среда в соединениях деталей ШУ — воздух, однако при обкатке узла и его работе существует вероятность попадания в стыки смазки, загрязнений, а также продуктов износа.

Так как контакты деталей ШУ прецизионных станков средних типоразмеров имеют относительно небольшие площади (не более 6600 мм^2) с минимальными погрешностями формы и расположения и часто подгоняются по "месту", рассмотрим контакт поверхностей, имеющих шероховатость и волнистость, т.е. ограничимся двухуровневой моделью стягивания. Для такой модели запишем выражение для относительных площадей контакта, связывающее различные уровни неровностей:

$$\eta = \eta_1\eta_2,$$

где $\eta = A_r/A_a$; $\eta_1 = A_r/A_c$; $\eta_2 = A_c/A_a$.

При построении модели контакта приняли, что площадь фактического соприкосновения образуется множеством круглых пятен контакта одинакового размера, равномерно расположенных на множестве круглых контурных площадок контакта также одинакового размера, в свою очередь равномерно расположенных на номинальной площади.

Размер пятен фактического контакта слабо зависит от нагрузки и принят постоянным. Средний радиус пятна контакта для различных материалов близок к 40 мкм [5].

Контакт двух поверхностей моделировали в виде цилиндрических выступов высотами Rz_1 и Rz_2, диаметром 80 мкм, контактирующих между

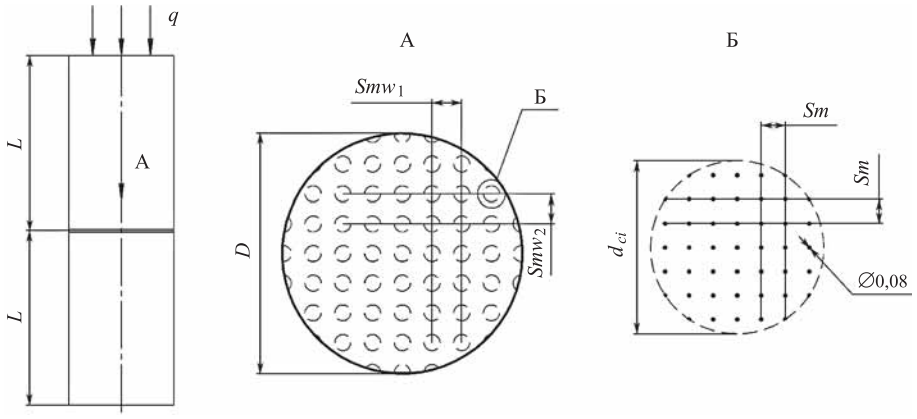


Рис. 3. Расчетная модель для определения термосопротивления в зоне контакта

собой на единичных контурных площадках A_{ci} (рис. 3).

Диаметр единичной контурной площадки контакта:

$$d_{ci} = 2\sqrt{A_{ci}/\pi}.$$

Площадь контурного пятна контакта

$$A_{ci} = A_c/n_c,$$

где A_c — контурная площадь контакта;

n_c — число волн, $n_c = \dfrac{A_a}{Smw_1 Smw_2}$;

Smw_1, Smw_2 — продольный и поперечный шаги волн.

При этом рассматривали ту поверхность из контактирующих, на которой число волн меньше.

Число фактических площадок контакта находили по выражению:

$$n_r = \frac{A_r}{\pi r_i^2},$$

где r_i — радиус единичного пятна контакта.

Число пятен фактического контакта на единичной контурной площадке:

$$n_{rci} = n_r/n_c.$$

Шаг единичных фактических пятен контакта внутри контурных площадок в продольном и поперечном направлении приняли одинаковыми:

$$Sm = \sqrt{\frac{A_{ci}}{n_{rci}}}.$$

Расчет фактической и контурной площадей в соединениях деталей ШУ может быть выполнен по методике, представленной в работе [6], в которой для приближенной оценки характера деформации выступов шероховатости предложен оценочный критерий:

$$\Pi = \frac{E^*}{H_м}\sqrt{\frac{Rp}{r}},$$

где $E^* = \left(\dfrac{1-\mu_1^2}{E_1} + \dfrac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)^{-1}$ — эквивалентный модуль Юнга;

E_i и μ_i — модули Юнга и коэффициенты Пуансона материалов контактирующих поверхностей;

$H_м$ — твердость материала;

Rp — высота сглаживания шероховатости;

r — средний радиус кривизны вершин выступов.

При $\Pi > 60$ контакт считается полностью пластическим, при $\Pi < 2$ — упругим, в остальных случаях — упругопластическим.

Контурная площадь контакта:

$$A_c = 1{,}8 A_a K_W \left(\frac{r_W}{R_W}\right)^{\frac{2}{4+2\delta_W}} \left(\frac{p_a}{E^*}\right)^{\frac{2}{2+\delta_W}},$$

где A_a — номинальная площадь;

K_W и δ_W — коэффициенты, зависящие от свойств материала, и соотношения высоты волн и шероховатости;

R_W — высота сглаживания волнистости;

r_W — средний радиус волн;

$$p_a = N/A_a .$$

Фактическая площадь контакта при упругопластическом и пластическом контакте определяется по выражению $A_r = N/\text{Н}_\text{м}$.

Для расчета фактической и контурной площадей используют измеренные геометрические параметры конкретных контактирующих поверхностей [6] или обобщенные данные для поверхностей деталей машин при механических методах их обработки [4].

Области варьирования шести переменных параметров для проведения регрессионного анализа составили: p_a = 0,6...6,5 МПа; Ra = 0,4...1,6 мкм; H = 1,6...12,6 мкм; Wz = 2,2...8,1 мкм; λ = 45...90 Вт/(м·К); λ = 0,025...0,15 Вт/(м·К).

Регрессионный анализ выполнили с использованием современного программного обеспечения (например, ANSYS). Указанная программа рассчитывает температурные поля в системах с учетом соединения деталей с различными коэффициентами теплопроводности и прохождения тепловых потоков через контакты этих деталей.

Расчетная модель для получения регрессионной зависимости представляет собой два стержня длиной L и диаметром $D = 2\sqrt{A_a/\pi}$, контактирующих торцами (см. рис. 3). В модели тепловой поток направлен на верхнюю поверхность верхнего стержня. Верхний стержень выполняет функции нагревателя, а нижний — холодильника.

Для определения термосопротивления в зоне контакта поверхностей R_k применен метод, в основу которого положен закон Фурье и дифференциальное уравнение теплопроводности для неограниченной пластины и изотермическими поверхностями при стационарных условиях теплового режима. При этих условиях контактное термическое сопротивление рассчитывают по формуле

$$R_k = \Delta T_k/q_{\text{ср}},$$

где ΔT_k — температурный перепад, определяемый графически методом линейной экстраполяции;

$q_{\text{ср}}$ — средний тепловой поток, который находится по градиентам температур в верхнем и нижнем стержнях.

Заключение

С учетом выбранных переменных проектных параметров регрессионная модель контактного термического сопротивления представлена в следующем виде:

$$R_k = b_1 p_a + b_2 Ra + b_3 H + \\ + b_4 Wz + b_5 \lambda + b_6 \lambda_c,$$

где $b_1 ... b_6$ — коэффициенты факторов, определяемые по результатам численного моделирования.

Создание регрессионной модели позволяет обосновать связь технологии обработки и физико-механических свойств поверхностей с величинами контактного термического сопротивления и дает возможность анализировать проектируемые шпиндельные узлы по температурному критерию.

Библиографический список

1. **Поляков А.Н., Парфенов И.В.** Актуальность тепловых проблем и состояние теплового моделирования в металлорежущих станках // Вестник Оренбургского государственного университета. 2001. № 3. С. 96—100.

2. **Демкин Н.Б.** Контактирование шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с.

3. **Клаузинг А.М., Чао Б.Т.** Термическое сопротивление контакта в вакууме // Труды американского общества инженеров-механиков. 1965. № 2. С. 98—116.

4. **Суслов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

5. **Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н.** Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 328 с.

6. **Демкин Н.Б., Измайлов В.В.** Развитие учения о контактном взаимодействии деталей машин // Вестник машиностроения. 2008. № 10. С. 28—32.

УДК 621.757

Ю.З. Житников, *д-р техн. наук,* **В.В. Пискунов**
(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)
E-mail: zhitnikovy@mail.ru

Обоснование погрешностей относительного смещения осей соединяемых деталей при роботизированной сборке

На основе матричного метода обоснованы погрешности относительного смещения осей соединяемых деталей при роботизированной сборке.

Based on the matrix method is substantiated error in the relative displacement of the axes of the parts in robotic assembly.

Ключевые слова: матричный метод, погрешность положения, относительное смещение осей, роботизированная сборка.

Keywords: matrix method, position error, the relative displacement of the axes, the robotic assembly.

В реальных конструкциях устройств роботизированной сборки изделий за счет погрешностей изготовления их элементов и динамических погрешностей при работе возникают относительные смещения и перекосы осей соединяемых деталей. При значительных смещениях и перекосах возникают случаи, когда невозможно обеспечить качественную сборку.

Для сведения к минимуму этих погрешностей и обеспечения качественной сборки ее следует осуществлять либо на основе адаптации активной (доориентации), либо пассивной (самодоориентации). Активная адаптация предусматривает наличие датчиков обратных связей и системы приводов отработки сигналов рассогласования. При активной адаптации резко повышается стоимость оборудования, снижается производительность сборки, увеличиваются габаритные размеры устройств, но главное — в процессе самой сборки нет доориентации. Это может вызывать некачественную сборку из-за возрастания сопротивления в сопряжении деталей при перекосах их осей, т.е. к заклиниванию деталей, сопрягаемых по цилиндрическим поверхностям, и к недовинчиванию резьбовых деталей.

Пассивная адаптация не требует направленного движения в сторону совмещения ее оси с осью другой детали или узла. Адаптация обеспечивается при одновременном выполнении трех требований [1]:

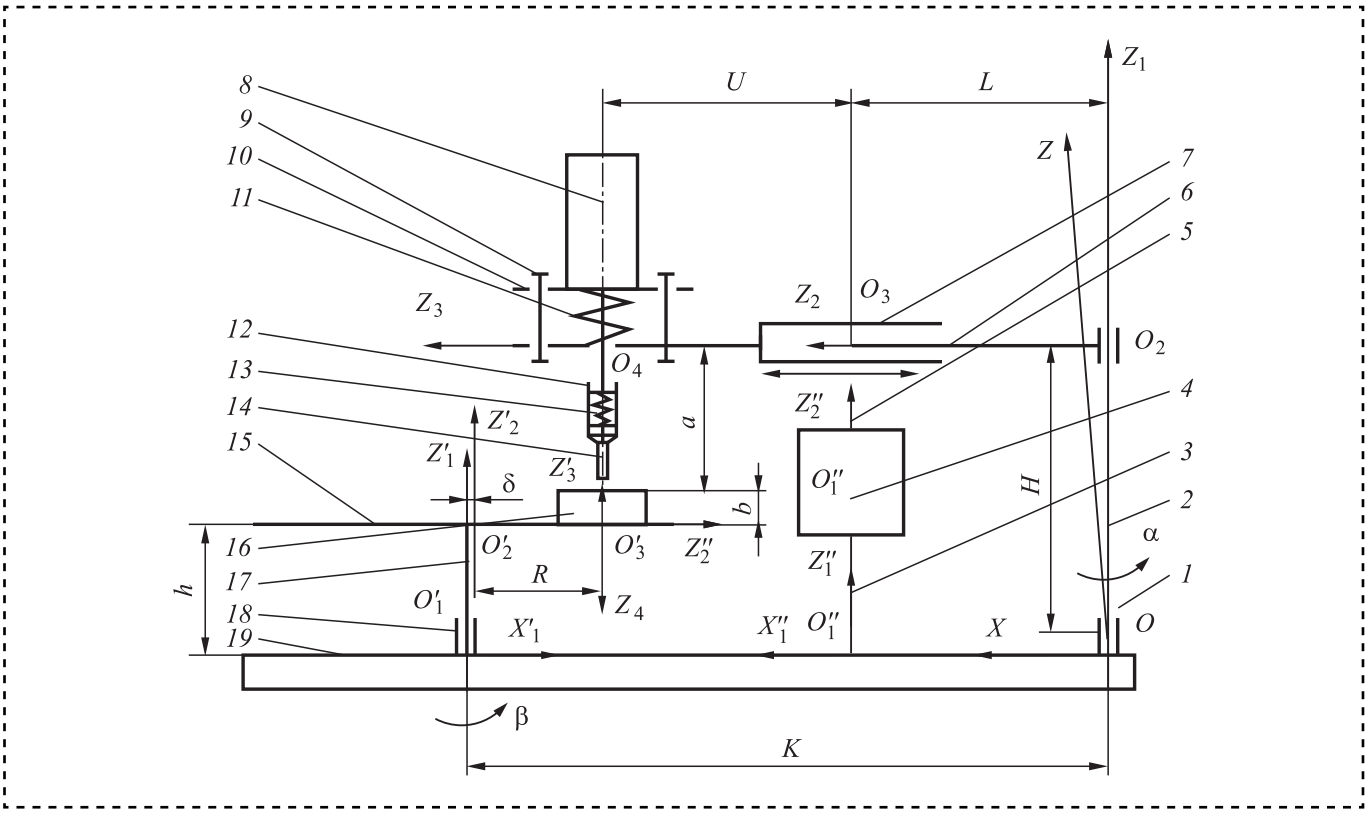
— силового взаимодействия соединяемой детали с поверхностью собираемого узла;

— наличия относительной и угловой податливости соединяемой детали;

— наличия вращательного движения соединяемой детали.

Предложена кинематическая схема сборочного комплекса, в котором доориентация соединяемых деталей обеспечивается на основе метода пассивной адаптации (рисунок).

Роботизированный комплекс закреплен на основании *19* и состоит из робота, поворотного стола и питателя шпилек магазинного типа. Робот состоит из корпуса *1* с поворотной стойкой *2*, по которой перемещается рука *6*, изменяя свою длину за счет подвижной части *7*. На подвижной части руки *7* расположено завинчивающее устройство *8* с патроном *12*, пружиной *13* и удерживаемой в разрезных резьбовых кулачках шпилькой *14*. Для обеспечения относительной и угловой податливости завинчивающего устройства оно снабжено податливым креплением, состоящим из болтов *9*, вставленных в отверстия фланца *10* завинчивающего устройства *8* с зазором, и витой цилиндрической пружиной *11*. Для стабилизации положения завинчивающего устройства *8* относительно подвижной части руки *7* пружина *11* вставлена в канавки фланца *10* и руки *7*.



Кинематическая схема роботизированного сборочного комплекса

Поворотный стол состоит из основания *18*, в которое вставлена ось *17*, жестко скрепленная с плоскостью стола *15*.

На поворотном столе расположен собираемый узел *16*, в который завинчиваются шпильки. На стойке *3* расположен питатель магазинного типа *4*, выдающий в ориентированном положении по одной шпильке со сборочной позиции *5*.

Роботизированный комплекс работает следующим образом.

В исходном положении завинчивающее устройство *8* расположено напротив питателя *4*. При опускании руки *6* робота разрезные резьбовые кулачки патрона *12* захватывают шпильки *14* за резьбовую часть. Рука поднимается и выдвигается до совмещения оси шпильки и резьбового отверстия на узле *16*. Рука опускается до касания шпилькой поверхности узла. Включается завинчивающее устройство. Происходит предварительная самодоориентация оси шпильки с осью резьбового отверстия и узла [1]. Шпилька завинчивается и затягивается, непрерывно доориентируясь. Вращение шпинделя завинчивающего устройства прекращается. Рука робота поднимается, а разрезные кулачки патрона снимаются с резьбы завинченной шпильки. Процесс сборки завершен.

Максимальное относительное смещение осей соединяемых деталей с применением завинчивающих устройств с податливым креплением, при котором гарантируется надежная автоматизированная сборка, составляет $\delta = 3{,}5$ мм. Это большая величина, поэтому такие завинчивающие устройства могут успешно применяться при роботизированной сборке.

Надежная роботизированная сборка резьбовых соединений будет обеспечена при условии, если относительное смещение осей соединяемых деталей Δ меньше максимально допустимого относительного смещения осей в завинчивающих устройствах с податливым креплением, т.е. $\Delta < \delta$.

Найдем максимальное относительное смещение осей соединяемых деталей в роботизированном сборочном комплексе на основе матричного метода.

Предварительно выберем абсолютную (неподвижную) систему отсчета и свяжем ее с основанием *1* робота — *XOYZ*. Каждому звену роботизированного комплекса назначим свои системы отсчета:

— $X_1O_1Y_1Z_1$ — стойки *2* робота;

— $X_2O_2Y_2Z_2$ — руки *6*;

— $X_3O_3Y_3Z_3$ — завинчивающего устройства, проходящая через его шпиндель;

— $X_1'O_1'Y_1'Z_1'$ — основания *18* стола;

— $X_2'O_2'Y_2'Z_2'$ — оси *17* стола;

— $X_3'O_3'Y_3'Z_3'$ — оси симметрии стола;

— $X_4'O_4'Y_4'Z_4'$ — плоскости стола *15*;

— $X_5'O_5'Y_5'Z_5'$ — собираемого узла *16*;

— $X_1''O_1''Y_1''Z_1''$ — стойки *3* питателя;

— $X_2''O_2''Y_2''Z_2''$ — стойки питателя *4* шпилек.

При изготовлении и сборке роботизированного комплекса возникают погрешности изготовления его элементов, неперпендикулярности и непараллельности осей и плоскостей, биения при вращении элементов устройств.

При матричном методе неперпендикулярность оси к плоскости исключается поворотом вокруг осей, расположенных на плоскости, а учитывается произведением матриц вращения вокруг этих осей:

$$B_{\text{вр}}\left(\bar{i},\ \Delta\alpha\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{j},\ \Delta\beta\right),$$

где $\Delta\alpha = \Delta\beta$ — углы поворота осей на плоскости для обеспечения перпендикулярности оси Z;

$\bar{i}$, $\bar{j}$ — единичные векторы осей X и Y.

Аналогичным способом учитывается непараллельность осей.

Совмещение всех трех осей по направлению с осями абсолютной системы отсчета учитывает произведение матриц:

$$B_{\text{вр}}\left(\bar{i},\ \Delta\alpha\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{j},\ \Delta\beta\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{k},\ \Delta\gamma\right),$$

где $\Delta\gamma$ — угол поворота системы отсчета вокруг вертикальной оси;

$\bar{k}$ — единичный вектор оси Z.

Смещения элементов устройства относительно начала абсолютной системы отсчета учитывают матрицами сдвига:

$$B_{\text{сдв}}\left(\bar{i},\ A+\Delta A\right);\ B_{\text{сдв}}\left(j,\ B+\Delta B\right);\ B_{\text{сдв}}\left(\bar{k},\ C+\Delta C\right),$$

где A, B, C — размеры смещения элементов устройства относительно абсолютной или предыдущей системы отсчета;

ΔA, ΔB, ΔC — допустимые отклонения размеров.

Положение оси шпильки в пространстве относительно абсолютной системы отсчета, удерживаемой в патроне завинчивающего устройства робота, определяют радиус-вектором положения ее конца:

$$\begin{gathered}\bar{R}_{\text{ш}} = B_{\text{вр}}\left(\bar{i}_1,\Delta\alpha_1\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{j}_1,\Delta\beta_1\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{k}_1,\Delta\gamma_1\right)\times\\ \times B_{\text{сдв}}\left(\bar{k}_1, H\pm\Delta H\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{i}_2,\Delta\alpha_2\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{j}_2,\Delta\beta_2\right)\times\\ \times B_{\text{вр}}\left(\bar{k}_2,\Delta\gamma_2\right) B_{\text{сдв}}\left(\bar{k}_2, L\pm\Delta L\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{i}_3,\Delta\alpha_3\right)\times\\ \times B_{\text{вр}}\left(\bar{j}_3,\Delta\beta_3\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{k}_3,\Delta\gamma_3\right) B_{\text{сдв}}\left(\bar{k}_3, U\pm\Delta U\right)\times\\ \times B_{\text{вр}}\left(\bar{i}_4,\Delta\alpha_4\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{j}_4,\Delta\beta_4\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{k}_4,\Delta\gamma_4\right) B_{\text{сдв}}\left(\bar{k}_4, A\pm\Delta A\right).\end{gathered}$$

В результате перемножения матриц получим координаты конца шпильки в пространстве: $X_{\text{ш}}$; $Y_{\text{ш}}$; $Z_{\text{ш}}$.

Аналогичным образом найдем радиус-вектор положения конца оси резьбового отверстия на узле относительно абсолютной системы отсчета, расположенном на поворотном столе, который из предыдущей позиции повернется на позицию сборки:

$$\begin{gathered}\bar{R}_{\text{о}} = B_{\text{сдв}}\left(\bar{i}, k\pm\Delta k\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{k}_1,\varphi\pm\Delta\varphi\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{i}_1',\Delta\alpha_1'\right)\times\\ \times B_{\text{вр}}\left(\bar{j}_1,\Delta\beta_1'\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{k}_1,\Delta\gamma_1'\right) B_{\text{сдв}}\left(\bar{k}_2',\Delta\delta\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{i}_2',\Delta\alpha_2'\right)\times\\ \times B_{\text{вр}}\left(\bar{j}_2',\Delta\beta_2'\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{k}_2',\Delta\gamma_2'\right) B_{\text{сдв}}\left(\bar{k}_2', R\pm\Delta R\right)\times\\ \times B_{\text{вр}}\left(\bar{i}_3',\Delta\alpha_3'\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{j}_3',\Delta\beta_3'\right) B_{\text{вр}}\left(\bar{k}_3',\Delta\gamma_3'\right) B_{\text{сдв}}\left(\bar{k}_3', b\pm\Delta b\right),\end{gathered}$$

где δ — биение стола при вращении (несовпадение оси вращения стола и его оси симметрии).

Перемножая матрицы, получим координаты конца оси резьбового отверстия на узле, расположенном на поворотном столе: $X_{\text{о}}$; $Y_{\text{о}}$; $Z_{\text{о}}$.

Разность координат осей шпильки и резьбового отверстия даст относительные погрешности, т.е. смещения их осей:

$$\Delta X = X_{\text{ш}} - X_{\text{о}};\ \Delta Y = Y_{\text{ш}} - Y_{\text{о}};\ \Delta Z = Z_{\text{ш}} - Z_{\text{о}}.$$

Гарантированное совмещение осей шпильки и резьбового отверстия будет обеспечено при условии:

$$\delta > \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}.$$

Обосновано условие гарантированного совмещения осей шпильки и резьбового отверстия на основе метода пассивной адаптации.

Библиографический список

1. **Автоматизация** производственных процессов в машиностроении: учебник / Ю.З. Житников и др.; под общ. ред. Ю.З. Житникова. Ковров: КГТА, 2008. 616 с.

2. **Пат. 2327556 РФ.** Многошпиндельный гайковерт для завинчивания шпилек с угловым рассогласованием осей / Ю.З. Житников, Б.Ю. Житников, Д.С. Воркуев, Ю.Н. Матросова. Б.И. 2008, № 18.

УДК 621.757:621.7.044.7

В.Н. Самохвалов, *д-р техн. наук*
(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева),
Ж.В. Самохвалова, *канд. техн. наук*
(Самарский государственный университет путей сообщения)
E-mail: samohvalov_vn@mail.ru

Прочность металлокомпозитных узлов при магнитно-импульсной сборке

Изложена методика расчета прочностных показателей соединений трубчатых деталей из композиционных материалов с металлическими переходниками, полученных давлением импульсного магнитного поля, при различных схемах сборки. Представлены результаты испытаний полученных соединений.

The methods of calculating the strength characteristics of the compounds of tubular parts made of composite materials with metal adapters received by pressure of pulsed magnetic field at various assembly schemes is stated. The results of tests of the compounds obtained are presented.

Ключевые слова: композиционный материал, сборка, магнитно-импульсный метод.

Keywords: composite, assembly, magnetic-pulse method.

Схемы сборки соединений

Важный регламентируемый показатель, определяющий качество механических узлов, включающих композиционные материалы, — механическая прочность соединения. При магнитно-импульсном методе сборки осесимметричных металлокомпозитных пакетов давлением импульсного магнитного поля с использованием трубчатых металлических переходников соединение может быть реализовано по двум основным схемам:

1. Сборка равномерным обжимом по всей длине металлического переходника с использованием многовитковых индукторов. Эта схема целесообразна при сборке соединителей с толстостенными композиционными конструкционными элементами как с использованием клея, так и без применения клея, если это нецелесообразно по условиям производства. Необходимым условием для сборки соединения является достаточная механическая прочность трубчатого композиционного элемента. Сборка может быть проведена с использованием технологической втулки, устанавливаемой внутрь трубчатого композиционного элемента и без технологической втулки, что возможно при точном расчете и дозировании энергии разряда магнитно-импульсной установки.

2. Сборка последовательной формовкой раздельных кольцевых рифтов с использованием одновитковых или многовитковых индукторов с концентраторами магнитного поля. Можно выделить два варианта рифтовой сборки пакетов с деталями их композиционных материалов:

— сборка формовкой отдельных глубоких рифтов. Такая схема сборки целесообразна, если на силовом элементе из композиционного материала возможно выполнение кольцевой проточки. Кольцевые канавки необходимой формы и размеров под рифты предварительно выполняют на подмотке, соединенной клеем с основной деталью из композиционного материала. При достаточно высокой механической прочности элемента из композиционного материала с выполненной на нем подмоткой сборку проводят без технологической втулки;

— сборка последовательной формовкой перекрывающихся мелких рифтов. В отличие от предыдущего варианта, шаг формовки рифтов меньше ширины рифта. За счет частичного перекрытия рифтов образуется волнистая поверхность контакта втулки и детали из композиционного материала. Схема сборки с мелкими рифтами может быть целесообразна, в частности, при сборке соединений, когда композиционный материал находится в полуотвержденном состоянии. При точном расчете энергии разряда магнитно-импульсной установки и параметров индуктора сборку проводят без применения технологической втулки. Возможно использование разъемной оправки, в том числе с профилированной поверхностью.

Характеристикой прочности осесимметричных трубчатых узлов при магнитно-импульсном методе сборки является сила срыва соединения.

Расчет силы срыва соединения при равномерном обжиме

Соединительный узел в этом случае фактически представляет собой соединение с натягом, который образуется при равномерном обжиме и совместной высокоскоростной деформации давлением импульсного магнитного поля металлического переходника и трубы из композиционного материала.

Прочность такого соединения (при сборке без применения клея) обеспечивается за счет сил трения по поверхности контакта переходника и детали из композиционного материала. Схема работы данного узла аналогична работе соединения с гарантированным натягом. Сила срыва соединения с гарантированным натягом [1]:

$$F = 1{,}25 f\pi dlp, \qquad (1)$$

где f — коэффициент трения на контактной поверхности;

d — номинальный диаметр сопряжения "переходник—труба";

l — длина сопрягаемых поверхностей;

p — давление на поверхности контакта,

$$p = \frac{\delta}{d\left(c_{\text{п}}/E_{\text{п}} + c_{\text{т}}/E_{\text{т}}\right)}, \qquad (2)$$

где δ — натяг в сопряжении;

$E_{\text{п}}$ и $E_{\text{т}}$ — модули упругости материалов металлического переходника и трубы из композиционного материала;

$c_{\text{п}}$, $c_{\text{т}}$ — коэффициенты:

$$\begin{aligned} c_{\text{т}} &= \left(d^2 + d_{\text{о}}^2\right)\Big/\left(d^2 - d_{\text{о}}^2\right) - \mu_{\text{т}}; \\ c_{\text{п}} &= \left(d_{\text{п}}^2 + d^2\right)\Big/\left(d_{\text{п}}^2 - d^2\right) - \mu_{\text{п}}, \end{aligned} \qquad (3)$$

где $d_{\text{о}}$ — диаметр отверстия в трубе из композиционного материала;

$d_{\text{п}}$ — наружный диаметр металлического переходника;

$\mu_{\text{т}}$ и $\mu_{\text{п}}$ — коэффициенты Пуассона материалов трубы и переходника.

Принимая, что механическая прочность в соединении не превышает прочность на разрыв трубы из композиционного материала, максимальный натяг в соединении определяем из условия несущей способности переходника. Интенсивность напряжений в материале переходника за счет натяга не должна превышать предела текучести ее материала:

$$\delta_{\max} = d\sigma_{\text{т}}/E_{\text{п}}, \qquad (4)$$

где $\sigma_{\text{т}}$ — предел текучести материала металлического переходника.

С учетом формул (1)—(4) максимально возможная сила срыва соединения пакета из композиционного материала с металлическим переходником при равномерном обжиме переходника:

$$F_{\max} = \frac{3{,}93 fdl\sigma_{\text{т}}}{\dfrac{E_{\text{п}}}{E_{\text{т}}}\left(\dfrac{d^2 + d_{\text{о}}^2}{d^2 - d_{\text{о}}^2} - \mu_{\text{т}}\right) + \dfrac{d_{\text{п}}^2 + d_{\text{о}}}{d_{\text{п}}^2 - d^2} - \mu_{\text{п}}}. \qquad (5)$$

Для заданного вида соединения трубчатого пакета из металлических и композиционных материалов по формуле (5) варьируемые параметры, определяющие силу срыва соединения при заданном диаметре сопряжения d: длина соединительного узла l и предел текучести $\sigma_{\text{т}}$ материала переходника.

Реальные значения силы срыва соединений будут ниже максимально возможных, рассчитанных по формуле (5), так как остаточные напряжения в соединении, как правило, существенно меньше предела текучести материала переходника. Это обусловлено упругой разгрузкой соединения после снятия давления импульсного магнитного поля. Поэтому применение схемы сборки без использования клея в соединении целесообразно только в конструкциях, не передающих большую осевую нагрузку.

При необходимости обеспечения высокой прочности металлокомпозитных узлов на срыв при схеме сборки равномерным обжимом следует использовать клеевое соединение. Магнитно-импульсный метод сборки позволяет обеспечить высокую точность геометрических параметров клеевого соединения (равномерность и минимально необходимую толщину клеевого слоя) за счет расчета и программирования эпюры силового воздействия [2], что является необходимым условием высокой прочности механических узлов, передающих большую осевую нагрузку, при обеспечении герметичности соединения.

Расчет силы срыва соединения с последовательной формовкой рифтов

Выполнение толстостенного металлического переходника нецелесообразно из весовых соображений, которые являются определяющими при создании конструкций, включающих композиционные материалы. Поэтому при достаточной толщине и прочности трубчатого элемента из композиционного материала разрушение (срыв) рифтового соединения может произойти только при пластической деформации (раздаче) переходника или смятии трубчатого композиционного элемента в зонах рифтового зацепления. При этом при равной прочности на разрыв менее прочным элементом соединения является переходник. Это обусловлено тем, что для радиальной

раздачи трубчатого переходника необходимо давление меньше предела текучести его материала:

$$p = 2\sigma_{\text{т}}\ln[(d + s_B)/d], \qquad (6)$$

где d и s_B — внутренний диаметр и толщина стенки переходника в соединении.

Расчетная схема соединения, полученного формовкой кольцевых рифтов, представлена на рис. 1.

В качестве исходной расчетной модели срыва такого соединения использована модель процесса волочения трубчатого металлического проводника по жесткой оправке [3], выполненной из композиционного материала. При волочении переходник увеличивается в диаметре за счет пластической деформации материала. Силу срыва соединения в этом случае определяют аналогично случаю стягивания соединительной втулки с провода [4]:

$$F_B = 0,5kS\left(\sigma_{\text{т}} + \sigma_{\text{тк}}\right)\ln\left(1 + f\,\text{ctg}\,\alpha\right), \qquad (7)$$

где $\sigma_{\text{т}}$ и $\sigma_{\text{тк}}$ — предел текучести материала переходника до начала и в конце деформации;

R — поправочный коэффициент, $k = 1,1...1,12$;

S — площадь поперечного сечения металлического переходника;

f — коэффициент трения в зоне контакта переходника и трубчатого композиционного элемента.

С учетом степенной аппроксимации кривой деформационного упрочнения металла

$$\sigma_{\text{тк}} = K\varepsilon^n, \qquad (8)$$

где K и n — константы деформационного упрочнения материала переходника;

ε — тангенциальная деформация материала в зоне рифта при его срыве (раздаче).

Исходя из геометрии рифта (см. рис. 1), формуемого при магнитно-импульсной сборке соединения, с учетом относительно небольшой глубины рифтов:

$$\text{ctg}\,\alpha \approx 2B/(D - d); \;\; \varepsilon = \left(D - d\right) - 1, \qquad (9)$$

где B — ширина рифта;

d и D — соответственно внутренний диаметр переходника по впадине и по вершине рифта.

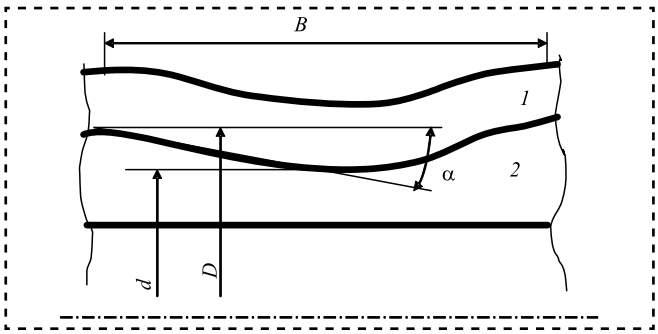


Рис. 1. Расчетная схема рифтового соединения:
1 — переходник; *2* — труба из композиционного материала

Площадь поперечного сечения металлического переходника в соединении равна его начальной площади сечения

$$S = \frac{\pi}{4}\left(d + 2s_B\right)^2 - \frac{\pi}{4}d^2, \qquad (10)$$

где s_B — начальная толщина стенки переходника.

Зависимость для силы начала стягивания переходника с трубы из композиционного материала за счет раздачи одиночного глубокого рифта:

$$F_B = 0,5k\pi\left(ds_B + s_B^2\right)\times$$
$$\times\left(\sigma_{\text{т}} + K\left[\left(D - d\right) - 1\right]^n\right)\ln\left(1 + 2f\,\frac{B}{D - d}\right). \qquad (11)$$

Как следует из зависимости (11), варьируемые параметры в данном случае при магнитно-импульсной сборке пакета из композиционных материалов: толщина стенки переходника, ширина и высота рифтов, полученная при сборке соединения. Изменение высоты и ширины рифтов при сборке формовкой отдельных глубоких рифтов может быть реализовано за счет формы и размеров протачиваемых кольцевых канавок, при выборе оптимальной энергии разряда магнитно-импульсной установки, исключающей чрезмерную деформацию трубчатого композиционного элемента.

При сборке соединения последовательной формовкой перекрывающихся мелких рифтов геометрия соединения задается за счет формирования соответствующей эпюры давления импульсного магнитного поля при профилировании геометрии и варьировании шириной рабочей зоны индуктора [2]. Толщину стенки переходника выбирают из условия равной прочности на разрыв металлического переходника и трубчатого композиционного элемента.

Деформация втулки при срыве соединения ε, а также угол α определяются высотой полученной волнистости. Поскольку высота рельефа поверхности контакта мала, то деформационным упрочнением материала можно пренебречь. Силы начала стягивания переходника с трубы из композиционного материала за счет смятия мелких рифтов при достаточной прочности на сдвиг композиционного материала трубчатого элемента:

$$F_B = 0,5nk\pi\left(ds_B + s_B^2\right)\sigma_{\text{с}}\ln\left(1 + 2f\,\frac{B}{D - d}\right), \qquad (12)$$

где n — число рифтов в зоне соединения;

$\sigma_{\text{с}}$ — напряжение смятия для материала переходника.

Анализ зависимостей (11) и (12) показывает, что наибольшую прочность соединения при прочих равных условиях обеспечивает сборка последовательной формовкой перекрывающихся рифтов, т.е. формирование волнистой поверхности контакта провода и втулки. Здесь, как и

Рис. 2. Соединение композиционных полимерных труб диаметром 100 мм с металлическими переходниками равномерным обжимом давлением импульсного магнитного поля

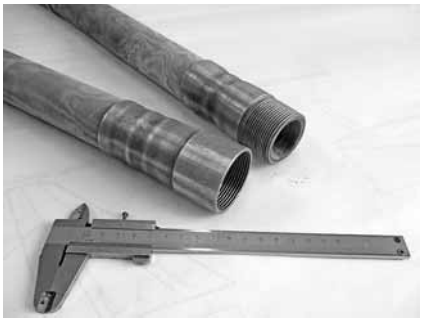


Рис. 3. Соединение композиционных полимерных труб диаметром 50 мм с металлическими переходниками формовкой соединительных рифтов давлением импульсного магнитного поля

в случае равномерного обжима переходника, в передаче силы работает вся внутренняя поверхность контакта композитного пакета и металлического переходника. Дополнительно прочность соединения растет как за счет увеличения площади контакта, так и за счет того, что срыв соединения возможен только при пластической деформации материала переходника, в зонах рифтового зацепления, при достижении напряжения смятия, которое выше предела прочности материала на разрыв.

Испытания соединений

Экспериментальные исследования, проведенные в Самарском национальном исследовательском университете, показали высокие прочностные характеристики металлокомпозитных соединений, полученных магнитно-импульсной сборкой.

При сборке газонефтяных труб диаметром 100 мм с толщиной стенки 12...15 мм из полимерных композиционных материалов (рис. 2) по схеме равномерного обжима металлического алюминиевого переходника без использования клея при длине зоны соединения (обжима) 80...100 мм сила срыва соединения составила около 60 кН.

В то же время при сборке тяг на основе стеклопластиковых труб диаметром 50 мм с толщиной стенки 5 мм по схеме равномерного обжима металлического стального переходника с использованием клея (толщина клеевого слоя не более 0,2 мм) при длине зоны соединения (обжима) 40 мм сила срыва соединения составила 140...150 кН. Испытание аналогичных тяг на основе стеклопластиковых труб диаметром 50 мм с толщиной стенки 5 мм (при выполнении подмотки толщиной 3...5 мм), полученных по схеме формовки двух рифтов на металлическом переходнике (рис. 3), показало силу срыва соединения около 70...90 кН.

Выполнена магнитно-импульсная сборка тяг на основе стеклотекстолитовых труб диаметром 50 мм с толщиной стенки 5 мм, находящихся в полуполимеризованном состоянии, по схеме формовки перекрывающихся рифтов. Испытания показали, что (после полного отверждения стеклотекстолита) при длине зоны соединения (обжима), равной 40 мм, сила срыва составила 150...170 кН, что выше прочности аналогичного клеевого соединения, полученного по схеме равномерного обжима.

Библиографический список

1. **Дальский А.М.** Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 5-е изд. М.: Машиностроение, 2003. 994 с.
2. **Самохвалов В.Н.** Расчет параметров процесса сборки металлокомпозитных узлов давлением импульсного магнитного поля // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 9. С. 12—17.
3. **Шаталов Р.Л.** Теория процессов прокатки и волочения. М.: Изд-во МГОУ, 1993. 250 с.
4. **Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В.** Прочностные характеристики соединений многопроволочных проводов контактной сети при магнитно-импульсной сборке // Вестник транспорта Поволжья. 2012. № 2. С. 62—67.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 11.05.2017. Подписано в печать 03.07.2017. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.