ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

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

2018 Том 19 **3 (212)**

СОДЕРЖАНИЕ

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Захарченко Д.Б., Первухина Е.Л., Тимофеев И.С., Осипов К.Н. Перспективные ИТ-решения в задачах анализа и контроля испытаний двигателей внутреннего сгорания 99

Гоцеридзе Р.М., Лукин К.Б. Статическая балансировка поплавковых чувствительных элементов гироприборов 106

Трение и смазка в машинах и механизмах

Бардушкин В.В., Сычев А.П., Сычев А.А., Мясников Ф.В., Кочетыгов А.А. Концентрация напряжений и деформаций в трибокомпозитах с наполненными жидкой смазкой сферическими микрокапсулами 113

Измайлов В.В. Влияние адгезионного взаимодействия на характеристики дискретного контакта технических поверхностей 120

Иргашев А.И., Иргашев Б.А. Оценка допустимой длины зубьев шестерен закрытых агрегатов при заданной износостойкости 126

Панин С.В., Корниенко Л.А., Хуан Цитао, Алексенко В.О., Иванова Л.Р. Функционализация порошковых и волокнистых микронаполнителей для СВМПЭ обработкой в полиорганосилоксане 131

Петренко А.А. Параметры катастрофического изнашивания 137

Мигранов М.Ш., Мухамадеев В.Р., Минигалеев С.М., Мухамадеев И.Р. Исследование морфологических изменений наноструктурного трехкомпонентного покрытия TiAlN 139

В помощь конструктору, технологу

Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Клычев А.А. Необходимые и достаточные условия надежного закрепления узлов при сборке изделий в приспособлениях с резьбовыми прижимами 143

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

Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

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

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

Председатель редакционного совета

В.И. КОЛЕСНИКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД
Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

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

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

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

КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

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

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

НИЖНИЙ НОВГОРОД
С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ХАБАРОВСК
В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

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

ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

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

ДОНЕЦК
А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

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

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

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

2018 Vol. 19 **3 (212)**

CONTENTS

Quality assurance. Testing. Monitoring

Zakharchenko D.B., Pervukhina E.L., Timofeev I.S., Osipov K.N. Advanced information technologies in problems of analysis and control of testing internal combustion engine . . . 99

Gotseridze R.M., Lukin K.B. Static balancing of float sensitive elements of gyro instruments . . . 106

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Bardushkin V.V., Sychev A.P., Sychev A.A., Myasnikov Ph.V., Kochetygov A.A. Stress and strain concentrations in tribocomposites filled with spherical micro-capsules with liquid lubricant . . . 113

Izmailov V.V. The influence of adhesive interaction on characteristics of a discrete contact of engineering surfaces . . . 120

Irgashev A.I., Irgashev B.A. Assessment of permissible length of gear teeth private aggregates in a given wear resistance . . . 126

Panin S.V., Kornienko L.A., Huang Citao, Alexenko V.O., Ivanova L.R. Functionalization of powder and fibrous microfillers for UHMW-PE by their treatment in polyorganosiloxane . . . 131

Petrenko A.A. Parameters of the catastrophic wear . . . 137

Migranov M.Sh., Muhamadeev V.R., Minigaleev C.M., Muhamadeev I.R. Investigation of morphological changes of nanostructural threecomponent coating TiALN . . . 139

Industrial and design engineer's aid

Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Klychev A.A. Necessary and sufficient conditions for reliable fastening of assemblies in the assembly of products in devices with threaded clamps . . . 143

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

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

Editors

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

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO
BRIANSK
O.A. GORLENKO
VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA
VOLGOGRAD
M.G. KRISTAL
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV
IZHEVSK
I.V. ABRAMOV
V.G. OSETROV
B.A. YAKIMOVICH
KAZAN
R.I. ADGAMOV
KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV
KOMSOMOLSK-ON-AMUR
B.N. MARJIN
A.M. SHPILEV
NABEREZHNYE CHELNY
S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV
NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV
OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV
ORENBURG
A.N. POLYAKOV
A.I. SERDUK
A.P. FOT
PERM
S.M. VELOBORODOV
V.F. MAKAROV
ROSTOV-ON-DON
V.I. KOLESNIKOV
A.A. RYZHKIN
RYBINSK
V.F. BEZIAZYCHNYI
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV
SAMARA
Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV
ST.-PETERSBURG
E.V. SHALOBAEV
SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA
TOMSK
A.V. KOLUBAEV
V.E. PANIN
TULA
A.A. MALIKOV
V.V. PREYS
KHABAROVSK
V.I. SCHPORT

Belarus
MINSK
V.L. BASINJUK
M.L KHEIFETZ
GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Ukraine
KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO
DONETSK
A.N. MIKHAILOV

Poland
P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

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

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

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

УДК 62-503.55: 519.683.8

Д.Б. Захарченко, Е.Л. Первухина, *д-р техн. наук,* **И.С. Тимофеев, К.Н. Осипов,** *канд. техн. наук,*
(Севастопольский государственный университет)
E-mail: pervukhina14@mail.ru

Перспективные ИТ-решения в задачах анализа и контроля испытаний двигателей внутреннего сгорания

Усовершенствовано алгоритмическое обеспечение автоматизированных производственных испытаний ДВС. Предложены новые решения в организации хранилища данных и обработки измерительной информации.

The software for automated industrial acceptance testing of ICE is improved. The new solutions to organize database and to process measuring information are proposed.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, автоматизированные производственные испытания, хранилище данных, программное обеспечение.

Keywords: internal combustion engine, automated industrial acceptance testing, database, software.

Введение

Принятая указом Президента Стратегия научно-технологического развития России определяет ключевые направления развития отечественной экономики в современных условиях глобальных вызовов и санкций и основные требуемые для этого инструменты. В ближайшие 10—15 лет приоритетами станут технологии, лежащие в основе "инновационного развития внутреннего рынка продуктов и услуг, устойчивого положения России на внешнем рынке", обеспечивающие, в том числе, "переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, новым материалам и технологиям конструирования".

Для отечественного машиностроения это означает выход на значимые позиции внутреннего и мирового рынка путем использования перспективных информационных технологий (ИТ). По сообщениям СМИ примером тому могут служить успехи "Ростсельмаша" и "КАМАЗа". Однако распространение передового опыта на другие предприятия и новые задачи требуют новых ИТ-инструментов, совместимых с используемыми ранее.

Внедрение интеллектуальных ИТ важно на всех стадиях производственного процесса, особенно при организации производства и контроле качества, в том числе на заключительных стадиях производства. Производственные испытания двигателей внутреннего сгорания (ДВС), неотъемлемый и важный этап процесса их создания, представляют сложный технологический процесс, предполагающий проверку качества, соответствия готовых двигателей техническим требованиям и определение путей дальнейшего совершенствования технологии изготовления. На этом этапе совмещаются задания условий тестирования двигателей и анализ поведения в этих условиях, а также сравнение характеристик готовых двигателей и норм, установленных ГОСТом Р и ТУ. Существующая классификация производственных испытаний делит их на приемо-сдаточные и контрольные. Несмотря на совершенствование и усложнение ДВС, методики и программы их испытаний в большинстве своем одинаковы: холодная обкатка, горячая обкатка без нагрузки, горячая обкатка под нагрузкой и т.д. Стоимость испытаний достаточно велика. Поэтому многие производители стараются снизить расходы на них, сокращая время обкатки двигателей, продолжительность испытаний, число измерений и контролируемых показателей, что сказывается на достоверности оценок технического состояния.

sb318.indd 99 06.03.2018 8:59:03

Обзор существующих стендов и программных продуктов

В настоящее время используется множество автоматизированных стендов для испытаний разных типов двигателей. Для каждого из стендов разработано собственное программное обеспечение (ПО) и интерфейс, как правило, уникальные и не допускающие гибкость настроек [1].

На отечественном рынке автоматизированные системы стендовых испытаний (АССИ) ДВС не распространены, испытания чаще всего выполняют в "ручном" режиме, когда полученные данные анализирует оператор, что заметно замедляет процесс испытаний, повышает их стоимость и снижает эффективность результатов. Внедрение автоматизированных систем сокращает время обработки экспериментальных данных и стоимость проведения испытаний, но из-за устаревших методик и технологий обработки информации не всегда обеспечивает необходимую точность и достоверность решений о готовности двигателей к будущей эксплуатации.

Несмотря на очевидность и важность развития ИТ на основе передовых алгоритмов обработки и анализа информации именно в машиностроении, приборостроении, в современной научно-технической литературе отсутствуют работы в этом направлении. Предлагаемые алгоритмы решения частных задач традиционными статистическими методами требуют результатов анализа данных о большом числе двигателей и ориентированы на использование в условиях эксплуатации, ремонтных мастерских, а не на производстве [2]. Анализ защищаемых диссертаций также показал отсутствие перспективных инновационных подходов и методик.

Традиционные методики испытаний, как правило, предполагают контроль превышения отдельными показателями допустимых значений. Однако этого недостаточно для выявления всех дефектов сборки, достоверного прогнозирования технического состояния изделий. Существующие программные средства, предназначенные для обработки результатов испытаний, в большинстве являются приложениями к стандартному ПО, представляя данные оператору испытаний о проведенном эксперименте в виде таблиц и/или графиков.

Стендовое ПО M-TEST 7.0 компании Magtrol, Inc (США) ориентировано на прямое считывание показателей: частоты вращения коленчатого вала испытуемого двигателя, положения поршня в цилиндрах, момента на валу, мощности и т.д. Преимущества ПО заключаются в возможности управления стендом, прогнозирования показателей двигателей разных типов, визуализации хода испытаний. Недостатки связаны с обязательным условием использования датчиков этой же компании, необходимостью их прямого подключения к стенду и невозможностью обрабатывать уже существующие данные в базе данных (БД) или применять имитационные модели.

Программный продукт ДИЗЕЛЬ-РК для моделирования поведения ДВС имеет возможность работы с имитационными моделями, расчета главных характеристик двигателей. Однако с его помощью нельзя анализировать результаты ранее проведенных испытаний, непосредственно подключать датчики к стенду. В научно-технической литературе отсутствуют данные об использовании указанных программных продуктов в производственных испытаниях двигателей.

Стенд для испытаний ДВС "Контур-СИД" ("КЭР-Инжиниринг", г. Казань) включает стендовое оборудование и ПО с функциональным набором, схожим с M-TEST 7.0, ПО обрабатывает результаты стендовых испытаний в реальном времени, обладает информативным пользовательским интерфейсом с возможностью детальной настройки оператором. Однако не позволяет обрабатывать результаты ранее проведенных испытаний и вычислительные эксперименты с имитационными моделями двигателей; отсутствуют алгоритмы принятия решений относительно соответствия характеристик двигателей заявленным в технической документации. Данный комплекс используется ООО "КАМАЗ".

Несмотря на разнообразие автоматизированных стендов для испытаний и ПО для обработки экспериментальной информации, в настоящее время не существует программно-аппаратных комплексов, позволяющих проводить испытания различных двигателей по различным программам, собирать экспериментальную информацию, сохранять результаты измерений в БД, моделировать и анализировать данные с использованием перспективных информационных технологий, поддерживая принятие решений по результатам испытаний с минимальным участием оператора и в условиях недостатка априорной информации о техническом состоянии испытуемых двигателей и условиях их сборки. ПО, используемое известными мировыми автопроизводителями, не всегда доступно отечественным предприятиям в условиях санкций и/или их высокой стоимости.

Необходимость обеспечения конкурентоспособности отечественной продукции на внутрен-

sb318.indd 100 06.03.2018 8:59:03

нем и мировом рынке подразумевает разработку математического обеспечения АССИ ДВС на основе передовых ИТ-решений.

Настоящая работа является продолжением исследований авторов [3—5] по созданию новых информационных технологий для использования в практике испытаний ДВС.

Цель работы — дальнейшее совершенствование алгоритмического обеспечения автоматизированных производственных испытаний ДВС и программная реализация вновь разработанных алгоритмов обработки измерительной информации для обеспечения требуемой достоверности оценки технического состояния и решений, принимаемых в ходе испытаний относительно годности выпускаемых двигателей для эксплуатации.

Достижение цели работы, особенно в условиях требуемого сокращения расходов на испытания, — сложная научно-техническая задача. На параметры собранных двигателей и условия сборки действует множество факторов, присутствует неопределенность их конкретного проявления. Полученная в ходе испытаний информация представляет совокупность косвенных и обобщенных характеристик рабочих процессов испытуемых двигателей, с помощью которых сложно выделить изменения, способные при интенсивном развитии привести к нарушению функционирования.

Методика испытаний

Предлагаемая усовершенствованная методика испытаний заключается в снятии экспериментальных данных в виде количественных значений информативных диагностических параметров испытуемых ДВС в равноотстоящие друг от друга моменты времени, и дальнейшего построения, идентификации, подгонки и проверки эмпирических моделей. Отличительная черта экспериментальных данных в виде динамических, или временных, рядов — зависимость между последовательными значениями измерений одинаковых и разных параметров. Определив статистический характер таких зависимостей и отслеживая в дальнейшем их изменение, можно сократить число контролируемых информативных диагностических параметров, прогнозировать их значения и выявлять события, необычные для нормального функционирования испытуемых ДВС [5]. Преимущества моделей — описание поведения наблюдаемых функционально сложных объектов даже в отсутствие полной априорной информации о физическом механизме происходящих в них рабочих процессов. Можно использовать неполные теоретические знания для выбора подходящего класса математических функций, которые затем могут быть эмпирически уточнены, т.е. ряд составляющих модели и численные величины параметров оцениваются при поступлении новых экспериментальных данных. Современные методы многомерного статистического анализа позволяют строить модели, учитывающие динамику многомерных случайных процессов с частично или полностью неизвестными вероятностными характеристиками, какими являются последовательности значений измеряемых параметров собранных ДВС в силу сложности протекающих в них рабочих процессов. Точная модель испытуемых двигателей (например, в виде системы дифференциальных уравнений, традиционных характеристик, спектров процессов [5]) исключительно эмпирическая и представляет крайние результаты моделирования. Наиболее адекватная реальным процессам модель есть промежуточный вариант.

Требования к создаваемому ПО

Алгоритмическое обеспечение автоматизированных производственных испытаний ориентировано на обработку эмпирической информации по мере ее поступления от датчиков: получение и проверку причинно-следственных зависимостей между информативными диагностическими, структурными параметрами двигателей и условиями сборки, контроль изменений коэффициентов этих зависимостей, расчет прогнозных значений параметров испытуемых ДВС с возможностью, в случае необходимости их проверки, использования классических детерминированных моделей, а также хранение этой и другой информации, набора правил и алгоритмов для принятия решений относительно соответствия характеристик ГОСТ Р или ТУ и годности двигателей к дальнейшей эксплуатации и выявления событий, необычных для их нормального функционирования.

Для этих целей созданы программные модули сбора, хранения и анализа данных, спроектирована структура многомерного хранилища данных, программно реализованы алгоритмы автоматической обработки и передачи данных из оперативной БД в хранилище [8]. Структура хранилища данных определяет особенности предлагаемой технологии обработки данных, которые заключаются в сегментировании исходных массивов данных. Традиционный под-

sb318.indd 101 06.03.2018 8:59:03

ход к сегментированию данных использует выделение из сходного потока информации одного или нескольких многомерных наборов данных в виде гиперкуба.

Оси гиперкуба содержат атрибуты (наименьшие структуры хранилища данных), организованные в виде иерархий, предоставляющих различные уровни их детализации. Ячейки гиперкуба содержат агрегируемые количественные данные. Благодаря такой модели данных пользователи могут формулировать сложные запросы, генерировать отчеты, получать подмножества данных. Такая структура хранилища данных определяет следующие возможности для пользователей — операторов испытаний:

предоставление результатов анализа в реальном времени испытаний;

осуществление логического и статистического анализа, характерного для данного приложения, и сохранение в доступном для пользователя виде;

многомерное концептуальное представление данных, включая полную поддержку для иерархий и множественных иерархий;

обращение к любой нужной информации независимо от ее объема и места хранения.

Программное приложение содержит комфортный интерфейс для ввода данных об испытуемых двигателях и их характеристиках и позволяет хранить информацию в оперативной БД, анализировать и представлять результаты испытаний в удобной для оператора форме.

Программная реализация разработанных алгоритмов анализа экспериментальных данных — составная часть математического обеспечения АССИ ДВС (рис. 1).

Ключевой элемент системы — стенд для проведения испытаний *1*. Физические характеристики двигателей и условий испытаний в виде последовательности численных значений выбранных параметров, снимаемые набором датчиков со стенда, принимаются подсистемой считывания характеристик *2*, которая преобразует физические величины в электронные, поступающие в подсистему хранения данных *3* для информации о результатах испытаний и анализа данных. Подсистема принимает на вход как данные с выхода подсистемы *3*, так и с выхода подсистемы анализа экспериментальных данных *4*, предназначенной для обработки данных эксперимента и определения, удовлетворяет ли двигатель характеристикам, заданным заводом-изготовителем, и годен ли он к эксплуатации.

Обработанные данные поступают как в подсистему *3*, так и в клиентскую часть системы *5*. Клиентская часть предназначена для вывода результатов эксперимента в графическом и/или табличном виде и результатов анализа данных. С использованием клиентской части оператор посредством системы управления испытаниями *6* управляет режимами и программой испытаний. При получении команд от оператора система управления испытаниями *6* передает информацию о необходимости изменения режима работы ДВС нагрузочному устройству *7*, обеспечивающему требуемые условия испытаний. В свою очередь, устройство *7* воздействует на стенд испытаний *1*.

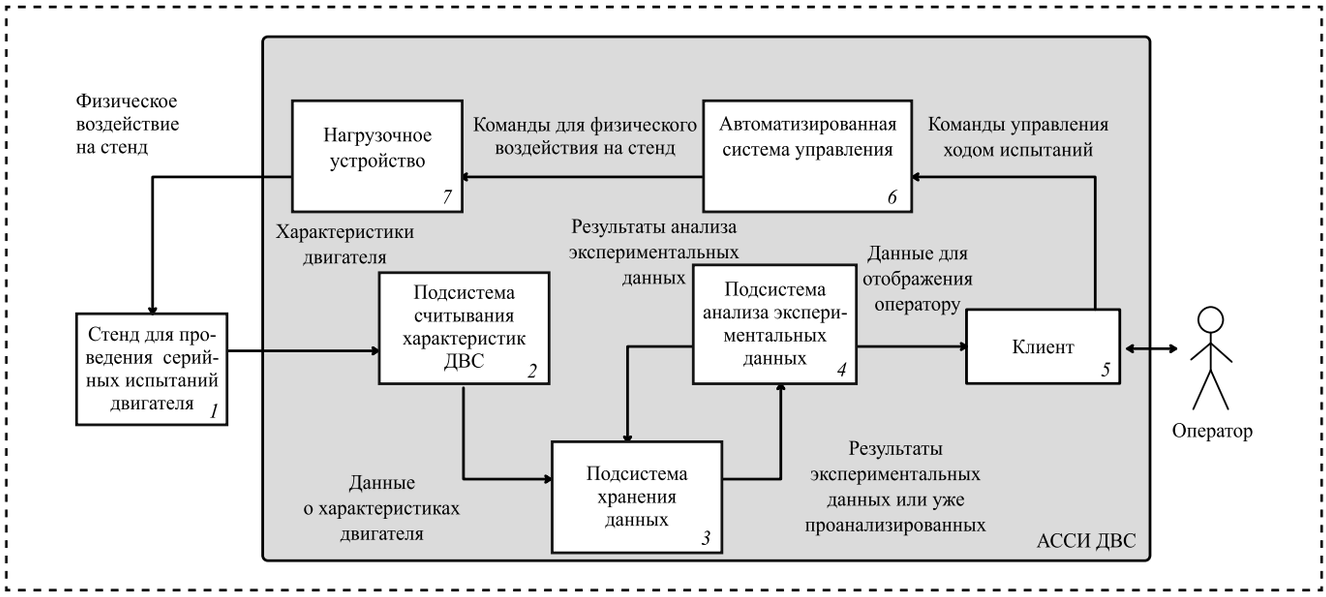


Рис. 1. Структурная схема АССИ ДВС

sb318.indd 102 06.03.2018 8:59:03

Обработка экспериментальных данных в системе испытаний

В существующих стендах приемо-сдаточных испытаний ДВС экспериментальные данные обрабатывают только после завершения цикла производственных испытаний. Предлагаемое усовершенствование связано с внедрением:

подсистемы анализа экспериментальных данных, в которую входят программные модули, включающие программно реализованные алгоритмы анализа данных и оперативную БД (реляционную БД), куда непосредственно поступает информация от датчиков, расположенных на испытуемом двигателе и нагрузочном устройстве;

подсистемы хранения данных, представляющей хранилище данных в виде как агрегированных, так и необработанных данных по каждому отдельному эксперименту.

В случае обнаружения изменения вида причинно-следственных зависимостей между информативными диагностическими, структурными параметрами двигателей и условиями сборки, недопустимого изменения коэффициентов этих зависимостей и/или прогнозных значений параметров испытуемых ДВС система принимает решение о несоответствии характеристик испытуемого двигателя ГОСТ Р или ТУ и формирует отчет о результатах испытаний. Система хранит историю испытаний, обеспечивает получение и хранение результатов измерений и анализа технического состояния в реальном времени испытаний.

С точки зрения развития ИТ основные теоретические исследования связаны с требованием эффективного функционирования АССИ ДВС и оперативной реализацией процессов сбора, хранения, обработки, передачи, представления и воспроизведения информации при обеспечении качества и эффективности решений, принимаемых по результатам испытаний. Особое внимание уделено информационному обеспечению процессов и систем испытаний, для чего предложен новый принцип организации и структурирования ПО. Существующее стендовое ПО является либо не расширяемым (не допускающим внесения изменений в предметную область на уровне доступа к данным) либо трудно расширяемым. Расширение предметной области требует существенных затрат на доработку программного продукта. Если представить ПО АССИ ДВС в виде трехуровневой модели: уровень доступа к данным, уровень бизнес-логики и уровень пользовательского представления, то расширение схемы базы данных требует внесения изменений в двух других уровнях ПО, что подразумевает полный цикл разработки.

Новое предлагаемое решение — реализация ПО, позволяющая на этапе компиляции строить на основе схемы БД так называемые динамические сущности (термин следует из принципа организации и структурирования ПО).

Система, представленная на рис. 1, позволяет: выводить данные о текущем состоянии испытуемых ДВС и условиях испытаний, анализировать экспериментальную информацию, строить графики причинно-следственных зависимостей между диагностическими и структурными параметрами, определять наличие и типы сборочных дефектов испытуемых двигателей, осуществлять доступ к истории испытаний, обрабатывать текущие данные и имеющиеся в БД, сохранять результаты в современных форматах. В основе построения разработанной БД — системы управления базами данных (СУБД) зарубежного производства, что затрудняет использование названий таблиц на кириллице с возможными побочными эффектами (рис. 2).

Расшифруем принцип построения БД, каждая запись которой имеет отношение только к одному объекту и потому называется реляционной. В таких БД отношение — информация об объектах одного типа — обычно хранится в виде таблицы.

В таблице *EngineModel* хранится информация о типе двигателя: идентификационный номер, тип топлива, номер производителя, число цилиндров, диаметр цилиндров, позицию, рабочее значение, уровень давления, номинальную мощность и максимальную скорость вращения; таблица *Engine* хранит информацию о конкретном двигателе: серийный номер и номер модели двигателя; таблица *FuelType* — о названии типа топлива; таблица *Experiments* — о номере двигателя, датах начала и окончания проведения испытаний; таблица *TimeMeasurements* — о характеристиках двигателя в определенный момент проведения испытаний и содержит поля: номер, скорость, угловую скорость, мощность, давление топлива, эффективность, концентрацию выхлопных газов и метана (в данной таблице нет поля *Time*, так как время можно вычислить по частоте дискретизации и порядковому номеру измерения); таблица *ProcessedMeasurements* —

sb318.indd 103 06.03.2018 8:59:04

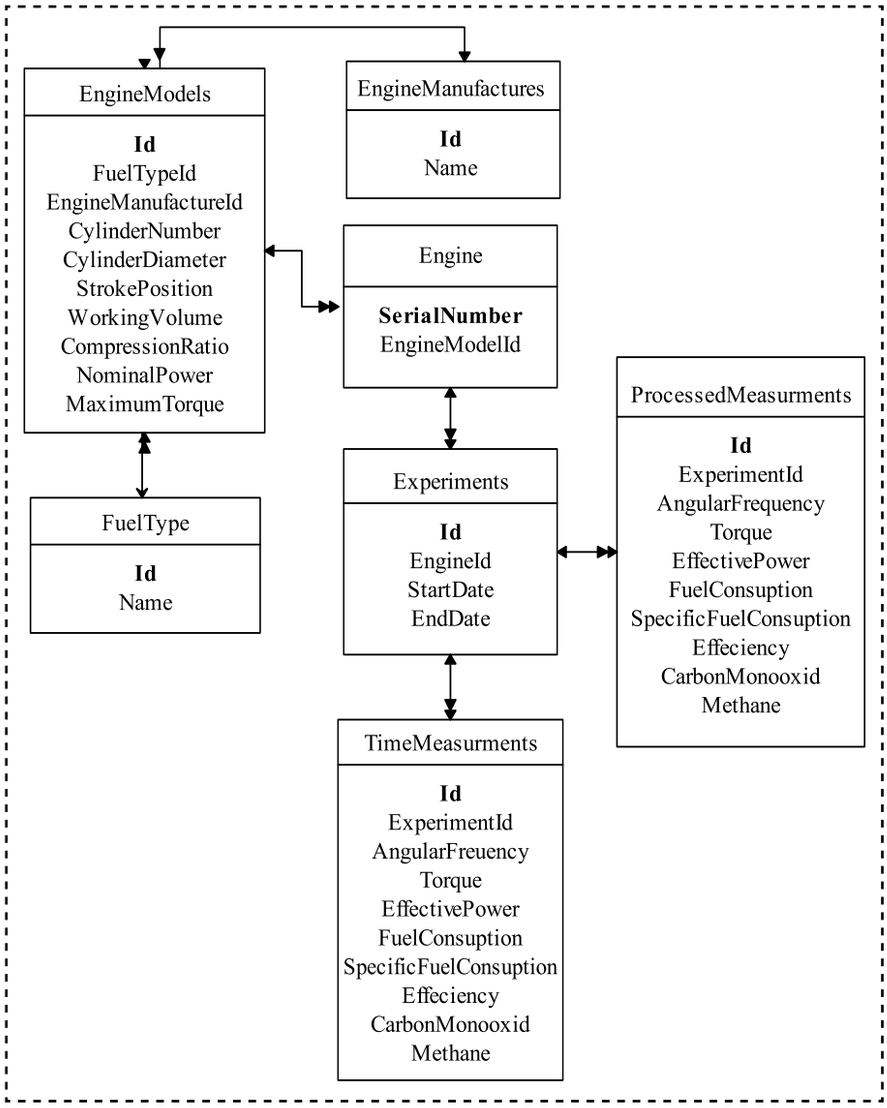


Рис. 2. Схема базы данных, используемой в приложении

о пересчитанных параметрах двигателя и содержит поля: номер, скорость, угловую скорость, мощность, давление топлива, эффективность, концентрацию выхлопных газов и метана (в таблице нет поля *Time*, так как время можно вычислить по частоте дискретизации и порядковому номеру измерения).

Все таблицы связаны с другими отношением "один ко многим".

Преимущества предложенного решения

Основное отличие предложенной структуры БД от существующих — ее разделение на оперативную часть (таблица *TimeMeasurements*, см. рис. 2) и на хранилище данных (таблица *ProcessedMeasurements*). Оперативная часть БД нужна для оперативного хранения измерительной информации, получаемой с датчиков стенда. Это позволяет обрабатывать данные в реальном времени испытаний. Хранилище данных может быть выполнено в виде отдельной, нереляционной БД (например, на базе NoSQL-технологий). Требуемая синхронизация данных между хранилищем и оперативной частью БД настраивается оператором испытаний (например, данные записывают каждые 10 мин или в конце цикла испытаний отдельно взятого ДВС). Данные из хранилища БД могут быть использованы для построения гиперкубов и для более глубокого анализа процесса испытаний ДВС.

Одну ось гиперкуба образуют атрибуты таблицы *TimeMeasurement* — диагностируемые параметры, вторую — результаты испытаний каждой серии ДВС, под иерархиями понимают третью ось гиперкуба (даты проведения испытаний), объединяющую каждый слой данных. Таким образом, расширяются возможности анализа данных приемо-сдаточных испытаний для серии выпускаемых ДВС.

Для расширения множества контролируемых диагностических параметров ДВС конечному пользователю достаточно, помимо расширения аппаратной части, внести новую колонку в таблицу *TimeMeasurements*. Интерфейс для такого рода изменений входит в пакет программ АССИ. После этого новый диагностический параметр включается в перечень контролируемых параметров и алгоритмы обработки измерительной информации. Преимущество решения заключается в возможности при добавлении или удалении атрибутов таблицы реляционной базы данных автоматически отражать данные изменения в уровнях бизнес логики и пользовательского представления.

sb318.indd 104 06.03.2018 8:59:04

Разработка и исследование моделей и алгоритмов анализа данных испытаний в целях обнаружения закономерностей в данных и их извлечениях предполагает также новый подход к организации диалога оператора испытаний с системой испытаний.

Важная задача — обеспечение "дружественного" хорошо визуализированного интерфейса пользователя для качественного вывода информации оператору испытаний. Созданный программный продукт не только анализирует экспериментальные данные на основе моделей ДВС и отображает требуемые выходные характеристики на пользовательском интерфейсе, но и позволяет оператору настроить рабочую панель удобным для него образом, представляя взаимодействующие графическую пользовательскую и серверную части для обнаружения производственных дефектов ДВС. Особенности программного продукта системы — возможность снятия точных данных, поддержание скорости снятия данных, обработка данных в реальном времени.

Пользовательский интерфейс необходим для выбора испытуемого двигателя, программы испытаний, проверки и изучения оператором его характеристик, а также расчета и вывода на экран оператора количественной оценки и прогноза значений параметров и решения о прохождении двигателем испытаний.

Заключение

Предложен новый подход к проектированию структуры БД, введено разделение на оперативную часть и на хранилище данных, что позволяет повысить качество обработки получаемой в ходе испытаний ДВС измерительной информации. Предложена новая архитектура ПО АССИ ДВС: введено его разделение на четыре уровня. Внедрена технология динамических сущностей, позволяющая расширять предметную область АССИ ДВС внесением изменений в схему БД без внесения изменений в остальные уровни ПО. Это существенно снижает стоимость использования всего комплекса АССИ ДВС и вероятность ошибок при принятии решений относительно годности собранных ДВС к эксплуатации.

Дальнейшие исследования предполагают обобщение результатов для создания научных основ перспективных ИТ, внедряемых в практику производственных испытаний сложных машиностроительных изделий, а также методов преобразования информации в знания; создание и исследование информационных моделей, методов обучения АССИ ДВС процессам обнаружения новых знаний о закономерностях рабочих процессов испытуемых изделий в зависимости от условий производства.

Библиографический список

1. **Захаров Ю.А., Кульков Е.А.** Анализ оборудования, применяемого для диагностики, испытания и проверки форсунок дизельных ДВС автомобилей // Молодой ученый. 2015. № 2. С. 154—157.

2. **Халиуллин Ф.Х., Ахметзянов И.Р.** Особенности составления диагностической матрицы Байеса при безразборной диагностике двигателей внутреннего сгорания // Международный научно-исследовательский журнал. Ч. 3. Екатеринбург, 2016. № 5 (47). С. 205—209.

3. **Первухина Е.Л., Валентюк М.Р., Осипов К.Н.** Современные информационные технологии в задачах производственных испытаний машиностроительных изделий // Автоматизация и современные технологии. 2015. № 10. С. 32—37.

4. **Первухина Е.Л., Голикова В.В., Осипов К.Н., Тимофеев И.С.** Управление автоматизированными производственными испытаниями ДВС с использованием информационных технологий // "Перспективные системы и задачи управления": материалы XI Всерос. науч.-практ. конф. и VII молод. школы-семинара "Управление и обработка информации в технических системах". Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ. Т. 2. 2016. С. 22—30.

5. **Pervukhina E., Osipov K., Golikova V.** Stochastic Models in Acceptance Testing for Complex Machines // IEEE Xplore Digital Library, Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management. Beer Sheva, 2016. P. 87—94.

sb318.indd 105 06.03.2018 8:59:04

УДК 681.2:658.5

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

Статическая балансировка поплавковых чувствительных элементов гироприборов

Освещены вопросы статической балансировки поплавковых чувствительных элементов (ПЧЭ) гироприборов и параметры неуравновешенности поплавков: остаточная сила тяжести ΔG или плавучести, момент дифферента $M_{диф}$, момент сил статической неуравновешенности $M_{ст}$ относительно оси подвеса.

Приведены этапы технологического процесса статической балансировки ПЧЭ. Рассмотрена предварительная балансировка ПЧЭ на воздухе после вакуумирования в балансировочной жидкости.

The questions of static balancing of float sensitive elements (FSE) of gyro instruments and to imbalance parameters of floats: the residual force ΔG of gravity or buoyancy, the moment of different M_{dif}, the moment of forces of static imbalance M_{st} relative to the suspension axis are discussed.

Stages of the technological process of static balancing of FSE are provided. Preliminary balancing of FSE in the air after evacuation in balancing liquid is considered.

Ключевые слова: балансировка, неуравновешенность, остаточная сила тяжести, момент дифферента, плавучесть, момент статической неуравновешенности, балансировочная жидкость, вакуумирование, гироприборы.

Keywords: balancing, imbalance, residual gravity, moment of different, buoyancy, moment of static imbalance, balancing liquid, vacuuming, gyro instruments.

К современным гироскопическим приборам систем управления и навигации (интегрирующим и дифференцирующим гироскопам, датчикам гирокомпасов и др.) предъявляют повышенные требования, обеспечивающие точность и надежность функционирования указанных систем.

Одно из важнейших требований — уменьшение моментов сил трения в опорах, для чего чувствительный элемент (ЧЭ) помещают в герметический кожух — поплавок, который образует с ним поплавковый узел (или поплавковый чувствительный элемент — ПЧЭ), полностью погружаемый в жидкость. Выталкивающая сила, действующая на ПЧЭ, разгружает опоры от действия его собственного веса и значительно снижает моменты сил трения.

Сборка поплавковых приборов связана с решением комплекса сложных технологических задач, одна из которых — статическая балансировка ПЧЭ. Даже незначительная его неуравновешенность вызывает существенную погрешность гироприбора.

Параметры неуравновешенности ПЧЭ и их влияние на функционирование прибора

На ПЧЭ, находящийся в жидкости, действует система параллельных сил, имеющих противоположную, направленность (рис. 1):

— собственная сила тяжести $\bar{G}$, приложенная в центре масс O_G;

— выталкивающая сила $\bar{P}$, приложенная в центре объема O_P.

В общем случае из-за погрешностей изготовления ПЧЭ и температурного режима жидкости координаты центра масс O_G и центра объема O_P не совпадают. Это приводит к неуравновешенности, в результате которой ПЧЭ всплывает (или погружается) или разворачивается вокруг осей x и z.

Неуравновешенность ПЧЭ характеризуется следующими параметрами:

— остаточная сила тяжести (или плавучести) $\Delta\bar{G}$;

sb318.indd 106 06.03.2018 8:59:04

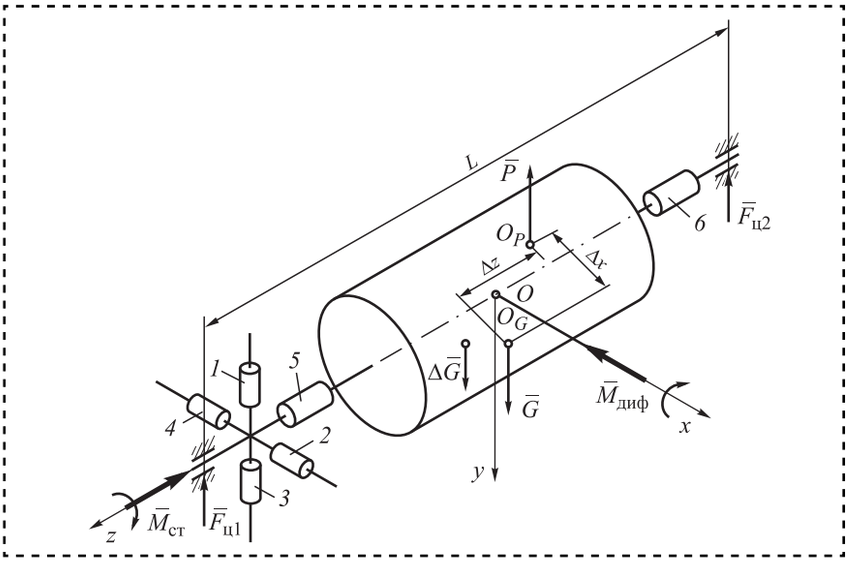


Рис. 1. Схема сил, действующих на ПЧЭ:
$\bar{P}$ — выталкивающая сила жидкости; $\bar{G}$ — сила тяжести ПЧЭ на воздухе; $F_{ц1}$ и $F_{ц2}$ — модули векторов; $\bar{F}_{ц1}$, $\bar{F}_{ц2}$ — реакции сил в опорах; $\bar{M}_{ст}$ — момент сил статической неуравновешенности относительно подвеса ПЧЭ; $\bar{M}_{диф}$ — момент сил дифферента; *1—4* — балансировочные винты для устранения $M_{ст}$ (*1*, *3* — винты с вертикальным перемещением; *2*, *4* — винты с горизонтальным перемещением); $\Delta\bar{G}$ — остаточная сила тяжести или остаточная выталкивающая сила; *L* — расстояние между цапфами опор ПЧЭ; *5*, *6* — шайбы

— момент силы дифферента $\bar{M}_{диф}$ относительно оси *x*;

— момент силы статической неуравновешенности $\bar{M}_{ст}$ ПЧЭ относительно оси *z* его подвеса.

Остаточная сила тяжести (или плавучесть) ПЧЭ. В силу погрешностей изготовления ПЧЭ (неточно выполненный объем — изменяется, сила тяжести), температурных погрешностей (иная плотность жидкости — изменяется выталкивающая сила) модули *P*, *G*, векторов $\bar{P}$, $\bar{G}$ сил соответственно выталкивающей и силы тяжести ПЧЭ на воздухе не равны друг другу:

$$\Delta G = G - P. \quad (1)$$

Их разность определяет остаточную силу ($\Delta G > 0$) или остаточную плавучесть ($\Delta G < 0$), которые приводят к всплытию или погружению ПЧЭ и, следовательно, к возникновению сил реакций в опорах $F_{ц1}$ и $F_{ц2}$ (см. рис. 1), что влечет к увеличению моментов сил трения вокруг измерительной оси *z*.

Момент сил дифферента $\bar{M}_{диф}$ ПЧЭ. Несовпадение координат центра масс O_G и центра объема O_P плоскости *zOy* приводит к образованию пары сил, которая создает вращающий момент вокруг оси *x*, называемой моментом дифферента ПЧЭ, Н·м:

$$\bar{M}_{диф} = \bar{G}Z_G + \bar{P}Z_P, \quad (2)$$

где Z_G и Z_P — проекции центров O_G и O_P на ось *z*.

Дифферент ПЧЭ приводит к его развороту вокруг оси *x* и возникновению противоположно направленных сил реакций в опорах, что также влечет увеличение моментов сил трения вокруг оси *z*.

В зависимости от направления вектора $\bar{M}_{диф}$ и момента сил дифферента (см. рис. 1) различают:

— правый дифферент, когда вектор $\bar{M}_{диф}$ момента сил дифферента сонаправлен оси *x*;

— левый дифферент, когда вектор $\bar{M}_{диф}$ момента сил дифферента противонаправлен оси *x*;

Момент статической неуравновешенности относительно оси подвеса ПЧЭ. Несовпадение координат центра масс O_G и центра объема O_P в плоскости *yOx* приводит к образованию пары сил, которая создает вращающий момент вокруг оси *z*, т.е. момент статической неуравновешенности ПЧЭ $M_{ст}$, Н·м:

$$\bar{M}_{ст} = \bar{G}X_G + \bar{P}X_P, \quad (3)$$

где X_G и X_P — проекции центров O_G и O_P на ось *x*.

Момент статической неуравновешенности особенно ухудшает точность прибора, так как совпадает с осью подвеса ПЧЭ.

Современные методы статической балансировки ПЧЭ в жидкости

ПЧЭ считается полностью сбалансированным, если величины всех трех параметров неуравновешенности меньше или равны их допустимым значениям, т.е.

$$\Delta G \leqslant \Delta G_{доп};$$
$$M_{диф} \leqslant \left(M_{диф}\right)_{доп}; \quad (4)$$
$$M_{ст} \leqslant \left(M_{ст}\right)_{доп}.$$

Уравновешивание ПЧЭ включает две технологических операции:

1. Статическое уравновешивание поплавка, осуществляемое за три перехода:

— устранение плавучести ΔG;

— уравновешивание по дифференту $M_{диф}$;

— регулирование статической неуравновешенности $M_{ст}$.

sb318.indd 107 06.03.2018 8:59:04

2. Контроль статической неуравновешенности.

Устранение плавучести. Устранение плавучести ПЧЭ проводят в ванне со специальной жидкостью, температуру которой поддерживают с высокой точностью. Плотность балансировочной жидкости при температуре балансировки должна быть равна плотности рабочей жидкости при ее рабочей температуре. ПЧЭ опускают в ванну и путем подбора по силе тяжести шайб *5* и *6* (см. рис. 1) добиваются уменьшения ΔG до допустимого значения.

Контроль плавучести ПЧЭ проводят путем прикрепления или снятия с него (в зависимости от того, всплывает или тонет ПЧЭ) контрольного груза с модулем G вектора $\bar{G}$ (см. рис. 1) силы тяжести. Если он начал тонуть, то плавучесть поплавка находится в пределах допуска. Аналогично поступают, если ПЧЭ тонул перед снятием контрольного груза G. Модуль G вектора $\bar{G}$ силы тяжести определяют по формуле, Н:

$$G = \frac{\Delta G_{\text{доп}} \gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{м}} - \gamma_{\text{ж}}}, \tag{5}$$

где $\gamma_{\text{м}}$, $\gamma_{\text{ж}}$ — плотность материала грузиков и жидкости при рабочей температуре соответственно.

Уравновешивание по дифференту. При наличии дифферента ПЧЭ, погруженный в жидкость, из горизонтального положения разворачивается вокруг поперечной оси. Устраняют дифферент путем снятия или навешивания дифферентных шайб *5*, *6* (см. рис. 1).

Контроль дифферента проводят следующим образом. На поднимающуюся вверх цапфу ПЧЭ навешивают контрольную шайбу силой тяжести $G_{\text{д}}$. Если после этого ПЧЭ перестает разворачиваться или начинает разворачиваться в обратную сторону, то его дифферент находится в пределах допуска. Модуль $G_{\text{д}}$ вектора $\bar{G}_{\text{д}}$ силы тяжести (позиции *5*, *6* на рис. 1) контрольной шайбы определяют по формуле

$$G_{\text{д}} = \frac{(\Delta D)_{\text{доп}} \gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{м}} - \gamma_{\text{ж}}}, \tag{6}$$

где $(\Delta D)_{\text{доп}}$ — модуль вектора $(\Delta \bar{D})_{\text{доп}}$ допустимой силы дифферента, заданный в виде приведенной к цапфам допустимой реакции.

Регулирование статической неуравновешенности $M_{\text{ст}}$. Статическую неуравновешенность регулируют радиальным перемещением балансировочных винтов *1—4* (см. рис. 1).

Для контроля балансировки по $M_{\text{ст}}$ используют контрольные шайбы с модулем $G_{\text{ст}}$ вектора $\bar{G}_{\text{ст}}$ силы тяжести навешиваемыми на головки регулировочных винтов (позиции *1—4* на рис. 1) на радиусе R.

Если после навешивания шайбы вращение ПЧЭ остановится или начнется в противоположном направлении, то модуль $M_{\text{ст}}$ вектора $\bar{M}_{\text{ст}}$ момента сил статической неуравновешенности находится в пределах допуска. Модуль $G_{\text{ст}}$ вектора $\bar{G}_{\text{ст}}$ силы тяжести (позиции *5*, *6* на рис. 1) контрольной шайбы определяют по формуле

$$G_{\text{ст}} = \frac{M_{\text{ст}} \gamma_{\text{м}}}{R(\gamma_{\text{м}} - \gamma_{\text{ж}})}. \tag{7}$$

Точность балансировки по $M_{\text{ст}}$ определяют также завинчиванием или вывинчиванием балансировочных винтов на угол φ, °:

$$\varphi = \frac{360 M_{\text{ст}} (\gamma_{\text{м}} - \gamma_{\text{ж}})}{S \gamma_{\text{м}} G_{\varphi}}, \tag{8}$$

где G_{φ} — модуль вектора силы тяжести винта, Н;

S — шаг резьбы винта, см.

Операции балансировки значительно упрощаются, если известны реальные значения параметров неуравновешенности ПЧЭ.

Этапы технологического процесса балансировки ПЧЭ

Рассмотрим балансировку поплавковых элементов гироскопических приборов и акселерометров.

Параметры неуравновешенности ПЧЭ: $M_{\text{ст}}$, $M_{\text{диф}}$, ΔG и допуски на них. Технические требования к статической неуравновешенности поплавковых элементов определяют допусками: ΔG — на плавучесть, $\bar{M}_{\text{диф}}$ — дифферент и $\bar{M}_{\text{ст}}$ — дисбаланс поплавка вокруг его продольной оси z (см. рис. 1). Балансировку проводят при рабочей температуре t жидкости прибора или нормальной температуре $t_{\text{н}}$ технологической жидкости, имеющей те же значения плотности и вязкости, что и рабочая жидкость прибора при температуре $t_{\text{р}}$.

Допуск на плавучесть определяет наибольшую допустимую разность между силой тяжести поплавка $G_{\text{п}}$ и выталкивающей силой $P_{\text{ж}}$.

Допуск на дифферент ограничивает величину наибольшего модуля $M_{\text{диф}}$ момента силы, действующего вокруг поперечной оси x поплавка.

Этот момент возникает при несовпадении центра масс поплавка с центром приложения выталкивающей силы вдоль оси y. Момент дифферента $M_{\text{диф}}$, Н·мм:

$$M_{\text{диф}} = G \Delta z, \tag{9}$$

где G — сила тяжести поплавка, Н;

sb318.indd 108 06.03.2018 8:59:05

Δz — проекция расстояния между центрами масс поплавка и давлением выталкивающей силы на продольную ось z поплавка, мм.

При наличии модуля $M_{диф}$ вектора $\bar{M}_{диф}$ момента силы одна из цапф поплавка всплывает. Вектор $\bar{M}_{диф}$ момента силы с модулем $M_{диф}$ вызывает реакцию в опорах цапф

$$D = M_{диф}/L, \quad (10)$$

где L — расстояние между цапфами.

Поскольку для приборов одного типоразмера $L = \text{const}$, то момент силы дифферента поплавка принято оценивать значением вызываемой им реакции сил на цапфе при горизонтальном положении поплавка. Допустимая величина модуля ΔD вектора $\Delta\bar{D}$ сил реакции:

$$\Delta D = \Delta M_{диф}/L, \quad (11)$$

где $\Delta M_{диф}$ — допустимый модуль ΔM вектора $\Delta\bar{M}_{диф}$ момента сил дифферента.

Для современных приборов допуск на дифферент находится в пределах $\Delta D = \pm(1...2)\cdot 10^{-3}$ Н.

Допуск на модуль ΔM вектора $\Delta\bar{M}$ момента сил дисбаланса поплавка вокруг оси z определяется выражением, Н·м:

$$\Delta M = G\Delta x, \quad (12)$$

где Δx — проекция расстояния между центрами масс поплавка и выталкивающей силы на поперечную ось x, мм.

В зависимости от размеров и назначения прибора этот допуск находится в пределах $M_{ст} = \pm(1...2)\cdot 10^{-4}$ Н · мм.

Отклонение ΔG от плавучести может быть положительным (поплавок тонет) и отрицательным (поплавок всплывает).

Допустимое значение ΔG для современных приборов находится в пределах $\Delta G = \pm(1...2)\cdot 10^{-3}$ Н.

Предварительная балансировка ПЧЭ на воздухе

Операции статической балансировки поплавка:

предварительная балансировка поплавка на воздухе относительно его цапф;

подготовка в жидкости поплавка, сменных гаек и винтов к балансировке;

регулировка плавучести;

регулировка дифферента;

окончательная балансировка поплавка вокруг продольной оси;

контроль плавучести, дифферента и уравновешенности поплавка вокруг продольной оси.

Предварительная балансировка поплавка на воздухе проводится на следующих станках:

на ножевых опорах с ленточными острыми ножами и с ножами, имеющими закругление с радиусом 0,2...0,5 мм;

в собственных или технологических подшипниках;

в разновращающихся подшипниках, периодически меняющих направление своего вращения;

с использованием эффекта Жуковского (опоры совершают возвратно-поступательные движения вдоль своей общей оси).

В станках по последним двум пунктам наименьшие моменты трения в опорах, поэтому они обеспечивают наибольшую точность при балансировке ПЧЭ.

Балансировка поплавка осуществляется предусмотренными его конструкцией элементами: наборами различных по массе сменных гаек или винтов для регулирования плавучести; переставляемыми или плавно перемещаемыми вдоль продольной оси поплавка гайками или винтами для уменьшения момента дифферента; радиально перемещаемыми винтами или гайками, применением специальных балансировочных ампул для статической балансировки поплавка относительно его цапф.

При предварительной балансировке совмещают центр масс поплавка с его продольной осью, а при окончательной балансировке в жидкости совмещают с этой осью центр давления вытесненной поплавком жидкости. При такой балансировке уравновешенность поплавка сохраняется и при изменении температуры рабочей жидкости в допустимых пределах.

Вакуумирование балансируемых ПЧЭ

Подготовка поплавка к балансировке сводится к его вакуумированию. Если на поверхности поплавка останутся микропузырьки воздуха и в таком виде поплавок будет статически отбалансирован в жидкости, то в дальнейшем при объединении отдельных микропузырьков в более крупные и блуждании последних по поверхности поплавка нарушится его статическая уравновешенность. Поэтому перед статической балансировкой удаляют воздух с поверхностей поплавка и его сменных деталей, а также из жидкости: поплавок и другие детали погружают в ванну с рабочей или технологической жид-

sb318.indd 109 06.03.2018 8:59:05

костью, накрывают крышкой (или стеклянным колпаком) и над жидкостью создают вакуум. Для тщательного удаления воздушных пузырей с поверхности поплавка вакуумирование проводят в течение нескольких десятков часов. Для повышения качества и сокращения цикла вакуумирования применяют ванны с поддерживающими поплавок устройствами, позволяющими проводить вакуумирование в два этапа. После вакуумирования извлекать поплавок из жидкости не рекомендуется. При вакуумировании поплавка в одной ванне и балансировке в другой переносить поплавок из одной ванны в другую следует быстро, не допуская стекания или высыхания жидкости с поверхности поплавка.

Регулировка плавучести поплавка

Регулируют плавучесть поплавка в технологической ванне с помощью сменных шайб или гаек, которые устанавливают на цапфах. Технологический допуск на плавучесть $\pm\Delta G'$ принимают несколько меньшим допуска $\pm\Delta G$, указанного в технических условиях. Это обусловлено тем, что плотность жидкости в приборе (в котором температура жидкости поддерживается с точностью, например, ±2 °С) изменяется в более широких пределах, чем в технологической ванне (где температура поддерживается с большей точностью, например $\Delta t' = \pm 0{,}1...\pm 0{,}2$ °С). Технологический допуск $\Delta G'$ на плавучесть при балансировке в ванне определяют по формуле

$$\Delta G' = \Delta G - \frac{G_п}{\rho_ж}\Delta\rho\Delta t, \qquad (13)$$

где G — сила тяжести поплавка, Н;

$\rho_ж$ — плотность жидкости при температуре $t_р$, г/см^3;

$\Delta\rho$ — изменение плотности жидкости при изменении ее температуры на 1 °С;

Δt — допуск на колебание температуры жидкости в приборе.

Точно отрегулировать "нулевую" плавучесть поплавка трудно — он либо тонет, либо всплывает. Чтобы проверить, находится ли плавучесть поплавка в пределах допуска, с него снимают или навешивают контрольный груз, имеющий на воздухе силу тяжести поплавка $G_к$, а в жидкости $\Delta G'$, равную технологическому допуску на плавучесть. Если при снятии или навешивании груза $G_к$ поплавок перестает тонуть или всплывать или изменяет направление своего движения, то плавучесть поплавка находится в пределах допуска $\Delta G'$. Силу тяжести контрольного груза на воздухе определяют по формуле

$$G_к = \frac{\Delta G'\rho_ж}{\rho_м - \rho_ж}, \qquad (14)$$

где $\rho_м$ — плотность материала контрольных грузиков при рабочей температуре $t_р$, г/см^3.

Балансировка поплавка относительно продольной оси

Регулировку дифферента поплавка проводят перестановкой или перемещением вдоль его продольной оси z специальных гаек и винтов, или одной из деталей, которые использовали для регулировки плавучести. Если придать поплавку положение, при котором продольная его ось горизонтальна, и затем поплавок отпустить, то при отсутствии дифферента $M_{диф}$ горизонтальность оси поплавка сохраняется. Это положение не зависит от точности регулирования плавучести. При наличии дифферента поплавка одна его цапфа поднимается, т.е. поплавок поворачивается относительно поперечной оси x.

Для проверки точности регулировки дифферента поплавка также применяют контрольные грузы. Если при установке контрольного груза на всплывающую цапфу поворот поплавка вокруг поперечной оси прекращается или он начинает поворачиваться в противоположную сторону, то дифферент поплавка, а следовательно, момент силы дифферента $M_{диф} = 0$ находится в пределах допуска. Силу тяжести контрольного груза для проверки плавучести поплавка определяют по формуле (13), в которую вместо допуска $\Delta G'$ на плавучесть подставляют допуск ΔD на дифферент. Поскольку дифферент поплавка практически не зависит от точности регулирования температуры рабочей жидкости, то указанный на него допуск технологически не уменьшают.

Для проверки плавучести и дифферента поплавка, особенно при их регулировании, в серийном производстве можно применять технологические ванны, корпуса которых изготовлены из прозрачного материала. На стенки корпуса наносят ряд горизонтальных линий на определенном расстоянии h друг от друга и ряд наклонных линий под углом α (рис. 2). В таких ваннах с достаточной точностью можно оценить степень плавучести и дифферент поплавка. Экспериментально для каждого типоразмера поплавка устанавливают допустимое наименьшее время, за которое поплавок опускается (поднимается) на высоту h или поворачивается на угол α,

sb318.indd 110 06.03.2018 8:59:05

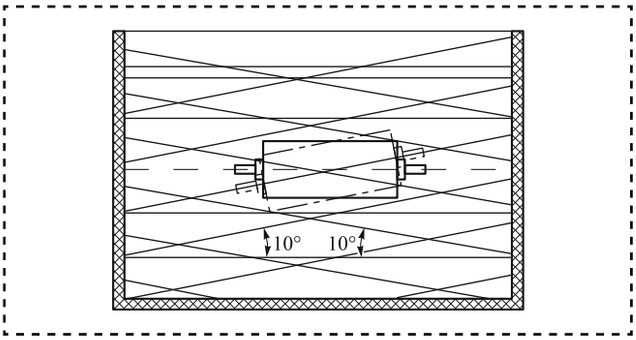


Рис. 2. Ванна для контроля плавучести и дифферента поплавка

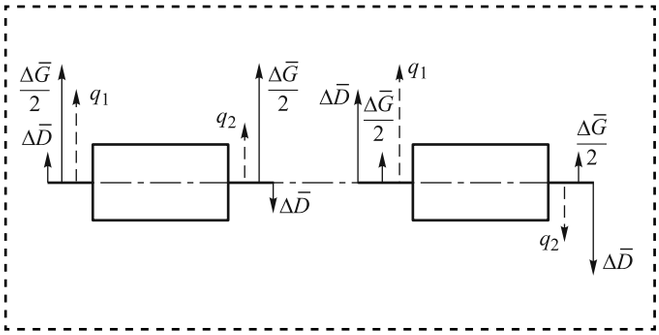


Рис. 4. Схема действия сил реакции на цапфы поплавка из-за отклонения $\Delta\bar{G}$ плавучести, $\Delta\bar{D}$ и дифферента от нулевых значений, которым соответствуют q_1 и q_2 показания преобразователей

если значения отклонения от плавучести и дифферента находятся в пределах соответствующих допусков $\Delta G'$ и ΔD. Если для перемещения поплавка по вертикали на высоту h или его поворота на угол α потребуется меньшее время, чем было экспериментально установлено, то это означает, что отклонения от плавучести поплавка или его дифферент превышают соответствующие допустимые значения. Такая ванна позволяет определить, находятся ли отклонения от плавучести или дифферент поплавка в пределах соответствующих допусков.

Для управления режимами технологического процесса (ТП) регулировки плавучести и дифферента необходимо оценивать их численные значения. Для этого применяют технологические ванны с преобразователями усилий на цапфах (рис. 3).

Установка состоит из технологической ванны с жидкостью и двух механических преобразователей силы с чувствительностью не менее $1 \cdot 10^4$ Н. Опущенный в ванну поплавок *1* устанавливают в отверстия тяг *2* двух преобразователей силы. Поворот стрелки *5* относительно нуля шкалы *4* пропорционален величине силы на тягу.

По алгебраической сумме показаний преобразователей q_1 и q_2 определяют отклонение от плавучести поплавка (рис. 4), которое не должно превышать допуск $\Delta G'$

$$|q_1 + q_2| \leqslant \Delta G'. \qquad (15)$$

По разности этих показаний определяют реакции на опоры поплавка из-за остаточного момента дифферента, которые не должны превышать допуска ΔD, т.е. $q_1 - q_2 \leqslant \Delta D$.

Балансировка поплавка относительно продольной оси — последний этап статической его балансировки — осуществляется перемещением в радиальном направлении специальных винтов или гаек. Например, поплавок с горизонтальными осями винтов под действием момента дисбаланса $M_{ст}$ от статической неуравновешенности поворачивается в каком-то направлении. Тогда отвинчивают поднимающийся винт (или ввинчивают опускающийся винт) до тех пор, пока поплавок не перестанет поворачиваться в первоначальном направлении или не начнет с меньшей скоростью поворачиваться в противоположном направлении. Затем поплавок поворачивается на 90° и указанный прием повторяется с другой парой винтов и гаек.

Для контроля уравновешенности поплавка можно использовать контрольный груз. Для рассмотренного случая при навешивании контрольного груза на головку поднимающегося винта поплавок

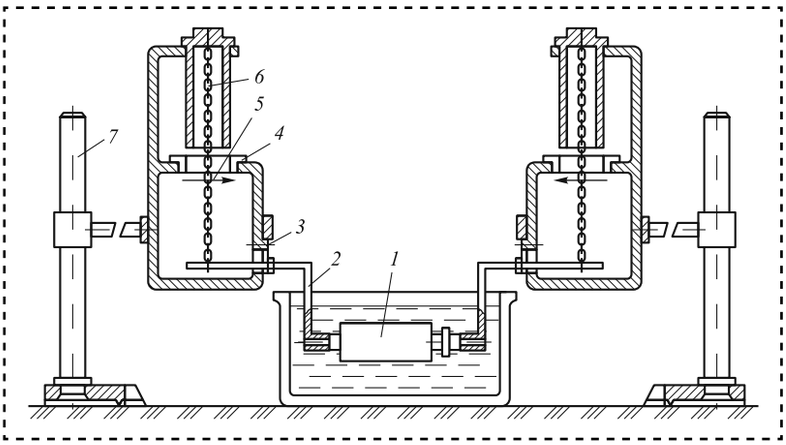


Рис. 3. Устройство для измерения параметров плавучести и дифферента поплавка:
1 — поплавок; *2* — тяга; *3* — упругий подвес; *4* — шкала (потенциометр); *5* — стрелка (щетка); *6* — упругий ЧЭ; *7* — стойка

sb318.indd 111 06.03.2018 8:59:05

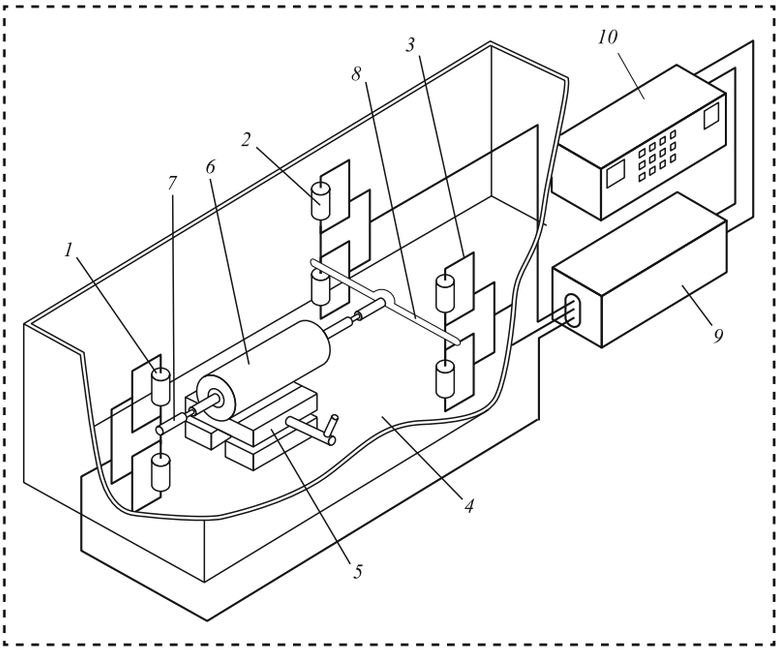


Рис. 5. Установка для одновременного определения трех параметров статической неуравновешенности поплавка:
1, 2, 3 — преобразователи силы; *4* — ванна с жидкостью; *5* — подставка; *6* — поплавок; *7* — захват; *8* — измерительный рычаг; *9* — вычислительное устройство; *10* — блок регистрации

должен прекратить поворот по часовой стрелке или начать поворачиваться в противоположную сторону. Модуль вектора $\bar{G}_к$ силы тяжести контрольного груза на воздухе определяют по формуле

$$G_к = \frac{\Delta M \rho_м}{R(\rho_м - \rho_ж)}. \quad (16)$$

Вместо контрольного груза можно вывинчивать или ввинчивать винт на контрольный угол $\varphi_к$:

$$\varphi_к = \frac{360 \Delta M \rho_м}{S G_г (\rho_м - \rho_ж)}, \quad (17)$$

где S — шаг резьбы винта, см;

$G_г$ — модуль вектора $\bar{G}_к$ силы тяжести гайки на воздухе, мН.

Повышение точности и снижение трудоемкости определения трех параметров неуравновешенности поплавка можно достигнуть на установке, позволяющей одновременно определять эти параметры на одном рабочем месте (рис. 5). Установка содержит электромеханические преобразователи силы *1*, *2*, *3*, расположенные в ванне *4* с жидкостью. В ней также находятся подставка *5*, поплавок *6*, одна цапфа которого соединяется захватом *7* с тягой преобразователя *1*. На другой цапфе поплавка установлен уравновешенный в жидкости измерительный рычаг *8* с плечом, равным *l*. Концы рычага взаимодействуют с преобразователями *2* и *3*. Величина выходного сигнала преобразователей *1*, *2*, *3* пропорциональна значениям реакции q_1, q_2, q_3, а полярность — ее направлению.

После опускания подставки *5* поплавок поддерживается в горизонтальном положении преобразователями силы. По сумме реакций определяют отклонение поплавка от плавучести. Если оно находится в пределах допуска, то выполняется условие $|q_1 + q_2 + q_3| \leqslant \Delta G'$. Разность реакции на опоры $q_1 - q_2 - q_3$ возникает из-за остаточного момента дифферента и не должна превышать допуска ΔD, т.е. $q_1 - q_2 - q_3 \leqslant \Delta D$. Составляющая $M_{ст}$ вектора дисбаланса поплавка вокруг продольной оси определяется выражением $M_{ст1} = (q_2 - q_3)l$.

Для определения второй составляющей $M_{ст2}$ поплавок поворачивают на 90°, определяют значения реакций q_2', q_3' и по ним $M_{ст2} = (q_2' - q_3')l$. По значениям $M_{ст1}$, $M_{ст2}$ определяют момент дисбаланса $M = \sqrt{\Delta M_{ст1}^2 + \Delta M_{ст2}^2}$, который не должен превышать допуска $M_{ст}$.

Все вычисления выполнены вычислительным устройством (ВУ) *9* и выведены на шкалу или записаны в блоке регистрации *10* (см. рис. 5).

Для автоматического устранения неуравновешенности поплавкового узла необходимо предусмотреть исполнительное устройство, работающее по программе, определяемой сигналами с ВУ, вычисляющего координаты и требуемую корректирующую массу, которую можно нанести напылением, а удалить электрофизическими методами (электроискровым выжиганием, лазерным лучом и др.).

Библиографический список

1. **Уразаев З.Ф., Асс Б.А., Алексеев Я.Н., Мясников Б.Я.** Сборка, регулировка и испытание авиационных приборов. М.: Машиностроение, 1983. 288 с.

2. **Иродов И.Е.** Механика. Основные законы. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. 309 с.

3. **Лукин К.Б.** Электронный курс по физике для дистанционного обучения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 1. 4 с.

4. **Ковалев М.П., Моржакова С.П., Терехова К.С.** Динамическое и статическое уравновешивание гироскопических устройств. М.: Машиностроение, 1979. 252 с.

5. **Гаврилов А.Н., Лебедев И.А.** Технология систем управления летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1974. 484 с.

sb318.indd 112 06.03.2018 8:59:06

УДК 539.3:621.891; 678.5

В.В. Бардушкин, *д-р физ.-мат. наук*
(Национальный исследовательский университет "МИЭТ"),
А.П. Сычев, *канд. физ.-мат. наук*, **А.А. Сычев, Ф.В. Мясников**
(Ростовский государственный университет путей сообщения),
А.А. Кочетыгов *(Национальный исследовательский университет "МИЭТ")*
E-mail: alekc_sap@mail.ru

Концентрация напряжений и деформаций в трибокомпозитах с наполненными жидкой смазкой сферическими микрокапсулами*

Решается задача моделирования локальных упругих характеристик композитов на основе фенилона с дисперсными включениями бесщелочного стекла и микрокапсулами, представляющими собой наполненные глицерином сферические оболочки каптона. Указанные характеристики определяются операторами (тензорами) концентрации напряжений и деформаций. Исследованы зависимости локальных упругих свойств трибокомпозитов от объемного содержания элементов неоднородности при фиксированном характерном размере микрокапсул (отношение толщины оболочки к радиусу жидкого наполнителя).

The problem of modeling of local elastic characteristics of the composites based on phenylon with dispersed inclusions of E-glass and microcapsules, which are glycerin-filled spherical shells of the kapton, is solved. These specified characteristics are determined by the operators (tensors) of stress and strain concentrations. The dependences of the local elastic properties of tribocomposites on volume content of the elements of heterogeneity at a fixed characteristic size of microcapsules are investigated (ratio of thickness of the shell to the radius of the liquid filling).

Ключевые слова: операторы концентрации напряжений и деформаций, матричный композит, включение, микрокапсула, капсулирование, смазка, моделирование.

Keywords: stress and strain concentration operators, matrix composite, inclusion, microcapsule, encapsulation, lubricant, modeling.

Введение

Перспективный подход к повышению работоспособности узлов трения — формирование многоуровневых структур на поверхностях трибосопряжений модифицированием полимерных матриц с помощью микрокапсул — микрочастиц смазочных материалов в полимерных оболочках. Микрокапсулы выделяют смазочное вещество при механическом разрушении в результате нагрузок на поверхностях трения, а сформированные модифицированные поверхностные слои обладают низким коэффициентом трения и повышенной износостойкостью [1, 2].

При эксплуатации в узлах трения, особенно тяжелонагруженных, модифицированные с помощью микрокапсул полимерные покрытия находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии (НДС). Поэтому необходимо проведение комплексных экспериментальных и теоретических исследований физико-механических (в частности, упругих) характеристик подобных микрокапсулированных материалов [3—5].

Численное моделирование упругих свойств неоднородных сред с включениями, находящимися в жидкой фазе, затруднено, так как значения их сдвигового модуля упругости равны нулю (а значит, матрица тензора модулей упругости является вырожденной) [3—6]. Для преодоления вычислительных проблем используют различные приемы. В работе [7] предложено вычисление

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-08-00262-а.

sb318.indd 113 06.03.2018 8:59:06

эффективных (эксплуатационных) упругих характеристик при рассмотрении концентрических сфер (внутренняя сфера состоит из материала включения, а внешняя — из материала матрицы) в матрице, образованной материалом с эффективными свойствами. Для вычисления эксплуатационных, локальных и предельных разрушающих физико-механических характеристик полимерных композитов с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла (БЩС) использовали обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей (ОСП) в варианте метода самосогласования [3—5]. В качестве нулевого приближения для параметров тела сравнения (однородное тело сравнения — важнейший момент ОСП) выбирали характеристики в приближении Фойгта [6]. Однако основной недостаток подхода, использованного в работах [3—5], — предположение о том, что сферическая оболочка микрокапсул не оказывает влияния на свойства материалов. В работе [8] с помощью ОСП в варианте метода самосогласования предложен подход, позволяющий совместить вычисление эксплуатационных характеристик матричных композитов с представлением о составном характере сферических включений. Этот подход позволил учесть влияние характерного размера микрокапсул (отношение толщины оболочки к радиусу жидкого наполнителя), состава и объемного содержания компонентов композитов на их эксплуатационные свойства.

Постановка задачи

Прогнозирование эксплуатационных свойств — важнейшая часть теоретических методов анализа, моделирования и расчета физико-механических характеристик неоднородных сред. Однако не менее актуальной является проблема оценки локального (внутреннего) НДС композитных материалов. Прогнозирование локальных физико-механических характеристик позволяет проводить анализ того, как физические поля концентрируются и перераспределяются в неоднородной среде. Это может быть полезным при решении ряда задач материаловедения, в частности, при оценке предельных разрушающих показателей матричных композитных структур [9].

Для анализа распределения локальных напряжений (деформаций) необходимо установление связи между напряжениями $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ (деформациями $\varepsilon_{ij}(\mathbf{r})$) в каждом элементе неоднородности и средними (внешними) напряжениями $\langle\sigma_{kl}(\mathbf{r})\rangle$ (деформациями $\langle\varepsilon_{kl}(\mathbf{r})\rangle$), приложенными ко всему композиту. Здесь и далее $\mathbf{r}$ — радиус-вектор случайной точки неоднородной среды, угловые скобки определяют процедуру статистического усреднения, которая при выполнении гипотезы эргодичности совпадает с усреднением по объему [6]. Подобную связь можно установить с помощью безразмерных операторов концентрации напряжений $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ и деформаций $K^{\varepsilon}(\mathbf{r})$ (тензоров четвертого ранга) [9]:

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = K^{\sigma}_{ijkl}(\mathbf{r})\langle\sigma_{kl}(\mathbf{r})\rangle;\ \ \varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) = K^{\varepsilon}_{ijkl}(\mathbf{r})\langle\varepsilon_{kl}(\mathbf{r})\rangle,$$
$$i,\ j,\ k,\ l = 1,\ 2,\ 3.$$

Для проведения корректного анализа локальной концентрации напряжений и деформаций в композите, позволяющего учитывать взаимодействие элементов неоднородности, состав, структуру материала, форму и концентрацию включений, необходимо решить уравнения равновесия упругой неоднородной среды. Однако в общем случае получить соотношения для численных расчетов операторов $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ и $K^{\varepsilon}(\mathbf{r})$ не удается. Поэтому для их вычисления применяют различные приближения, например ОСП. В его рамках используется только сингулярная составляющая тензора Грина уравнений равновесия, зависящая лишь от дельта-функции Дирака, а также вводится однородное тело сравнения, материальные константы которого входят в окончательные выражения для вычисления операторов $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ и $K^{\varepsilon}(\mathbf{r})$. Физический смысл ОСП заключается в предположении однородности полей напряжений и деформаций в пределах элемента неоднородности. В этом случае выражения для операторов $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ и $K^{\varepsilon}(\mathbf{r})$ имеют следующий вид (индексы опущены) [9]:

$$K^{\sigma}(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r})\left(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r})\right)^{-1}\times \\ \times\left\langle c(\mathbf{r})\left(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r})\right)^{-1}\right\rangle^{-1}; \quad (1)$$

$$K^{\varepsilon}(\mathbf{r}) = \left(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r})\right)^{-1}\left\langle\left(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r})\right)^{-1}\right\rangle^{-1}, \quad (2)$$

где I — единичный тензор четвертого ранга;

$c(\mathbf{r})$ — тензор модулей упругости;

$c''(\mathbf{r})$ — разность между соответствующими параметрами неоднородной среды $c(\mathbf{r})$ и однородного тела сравнения c^{c}, $c''(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r}) - c^{c}$;

$g(\mathbf{r})$ — интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия, являющийся тензором четвертого ранга.

sb318.indd 114 06.03.2018 8:59:06

Для вычисления компонент g_{ijkl} тензора $g(\mathbf{r})$ необходимо рассчитать компоненты a_{iklj} тензора четвертого ранга A, а затем в a_{iklj} по двум парам индексов (i, j и k, l) провести операцию симметризации [6]:

$$a_{iklj} = -\frac{1}{4\pi}\int n_k n_j t_{il}^{-1} d\Omega, \qquad (3)$$

где $d\Omega$ — элемент телесного угла в сферической системе координат, $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$;

t_{il}^{-1} — элементы матрицы, обратной матрице T с элементами $t_{il} = c^{c}_{iklj} n_k n_j$;

n_k, n_j — компоненты вектора внешней нормали к поверхности включения, $k, j = 1, 2, 3$.

Для эллипсоидальных включений с главными полуосями l_1, l_2 и l_3 компоненты вектора нормали определяют соотношениями

$$n_1 = \frac{1}{l_1}\sin\theta\cos\varphi;\ \ n_2 = \frac{1}{l_2}\sin\theta\sin\varphi;\ \ n_3 = \frac{1}{l_3}\cos\theta.$$

Анализ соотношений (1) и (2) показывает, что операторы $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ и $K^{\varepsilon}(\mathbf{r})$ зависят только от материальных параметров среды и структуры материала. Таким образом, исключается информация о виде среднего (внешнего) НДС композита. Отсюда вытекает удобство оценки локального НДС неоднородной среды при помощи тензоров концентрации напряжений и деформаций.

В случае выполнения условия эргодичности используют усреднение по объему (для каждого компонента композита). Тогда операция усреднения по всему объему материала для некоторой случайной величины $a(\mathbf{r})$ сводится к суммированию:

$$\langle a(\mathbf{r})\rangle = \sum_s V_s \langle a_s(\mathbf{r})\rangle, \qquad (4)$$

где V_s и $a_s(\mathbf{r})$ — объемная концентрация компонента s-го типа и соответствующая этому компоненту случайная величина, $\sum_s V_s = 1$ [6].

В предположении, что компоненты композита изотропны, соотношения (1) и (2) для операторов концентрации напряжений и деформаций в компоненте композита s-го типа с учетом выражения (4) имеют следующий вид:

$$K_s^{\sigma} = c_s\left(I - g_s\left(c_s - c^{c}\right)\right)^{-1}\times \left(\sum_i V_i c_i\left(I - g_i\left(c_i - c^{c}\right)\right)^{-1}\right)^{-1}; \qquad (5)$$

$$K_s^{\varepsilon} = \left(I - g_s\left(c_s - c^{c}\right)\right)^{-1}\times \left(\sum_i V_i\left(I - g_i\left(c_i - c^{c}\right)\right)^{-1}\right)^{-1}, \qquad (6)$$

где c_s — тензор модулей упругости s-го компонента композита;

g_s — тензор $g(\mathbf{r})$, соответствующий s-му компоненту композита, вычисляемый с помощью соотношения (3) и последующей процедуры симметризации.

Метод прогнозирования

Расчет по методу прогнозирования локальных упругих свойств многокомпонентных матричных композитов со сферическими включениями в виде микрокапсул, заполненных жидким смазывающим веществом, проводят в два этапа.

На первом этапе вычисляют эффективные упругие свойства и операторы $K^{\sigma}(\mathbf{r})$, $K^{\varepsilon}(\mathbf{r})$ для двухкомпонентного композита, имитирующего сферические микрокапсулы, заполненные жидким смазывающим веществом. Эффективные упругие свойства определяют с помощью тензора четвертого ранга c^*, связывающего средние значения напряжений $\langle\sigma_{ij}(\mathbf{r})\rangle$ и деформаций $\langle\varepsilon_{kl}(\mathbf{r})\rangle$ в неоднородном материале:

$$\langle\sigma_{ij}(\mathbf{r})\rangle = c^*_{ijkl}\langle\varepsilon_{kl}(\mathbf{r})\rangle,\ \ i, j, k, l = 1, 2, 3.$$

Выражение для c^* в ОСП имеет следующий вид (индексы опущены) [6]:

$$c^* = \left\langle c(\mathbf{r})\left(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r})\right)^{-1}\right\rangle\left\langle\left(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r})\right)^{-1}\right\rangle^{-1}. \qquad (7)$$

В предположении, что компоненты композита изотропны, соотношение (7), с учетом (4), имеет следующий вид:

$$c^* = \left(\sum_s V_s c_s\left(I - g_s(c_s - c^{c})\right)^{-1}\right)\times \left(\sum_s V_s\left(I - g_s(c_s - c^{c})\right)^{-1}\right)^{-1}. \qquad (8)$$

В формулах (7) и (8) тензоры имеют тот же смысл, что и соотношениях (1), (2), (5), (6) для операторов $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ и $K^{\varepsilon}(\mathbf{r})$.

На втором этапе метода осуществляют "стандартный" расчет по формулам (5) и (6) локальных упругих характеристик многокомпонентного композитного материала, элементами неоднородности которого служат сферические микрокапсулы с эффективными модулями упругости, вычисленными на первом этапе, а также функционализирующие добавки в виде включений других материалов и матрица.

Выполнение первого этапа метода прогнозирования упругих свойств трибокомпозитов

sb318.indd 115 06.03.2018 8:59:07

позволяет учитывать геометрические размеры включений в оболочке. Рассмотрим двухкомпонентный матричный композит (материалом матрицы служит материал оболочек микрокапсул), в котором случайным образом расположены включения жидкого смазывающего вещества, имеющие сферическую форму среднего радиуса R. Предположим, что материал — статистически однородный. Это приводит к наличию среднего расстояния между включениями, которое связано с их объемной концентрацией. Для установления данной связи представим некоторый усредненный элементарный объем, в котором находятся три одинаковых включения (рис. 1). Пусть отдельное включение представляет собой шар радиусом $R + h_1$, где величина h_1 такова, что все три шара соприкасаются. Тогда расстояние между центрами шаров равно $2(R+h_1)$. Поскольку в пространстве между касающимися друг друга шарами образуются пустоты, за характерную толщину h оболочек микрокапсул следует выбрать величину, несколько бóльшую, чем h_1. Выберем в качестве h следующее значение:

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2},$$

где h_2 — толщина, при условии что все три шара радиусом $R + h_2$ проходят через центр равностороннего треугольника со стороной $2(R+h_1)$ (см. рис. 1), $h_2 = \dfrac{(2-\sqrt{3})R + 2h_1}{\sqrt{3}}$.

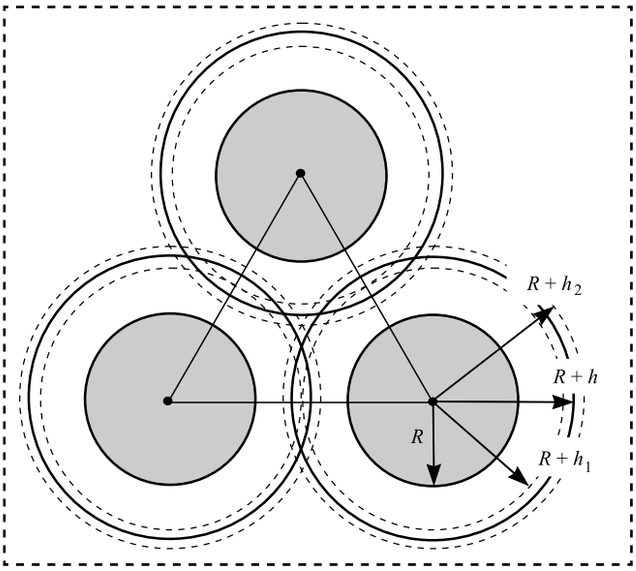


Рис. 1. Модель первого этапа прогнозирования упругих характеристик трибокомпозитов

Введем безразмерный параметр микроструктуры h/R и установим его связь с объемной долей "внутреннего" жидкого тела $V_т$ (или объемной долей оболочки $V_{об}$). Так как характерная толщина слоя оболочки равна h, а средний радиус "внутреннего" тела — R, то имеем систему уравнений, связывающих объемные доли и геометрические размеры компонентов:

$$V_т + V_{об} = 1;\ \frac{V_{об}}{V_т} = \frac{\dfrac{4\pi(R+h)^3}{3} - \dfrac{4\pi R^3}{3}}{\dfrac{4\pi R^3}{3}} = \left(1 + \frac{h}{R}\right)^3 - 1.$$

Объемные доли $V_т$ и $V_{об}$ выразим через характерный размер h/R:

$$V_т = \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-3};\ V_{об} = 1 - \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-3}. \qquad (9)$$

Опираясь на соотношения (9), вычисления по формулам (8), (5) и (6) тензоров c^*, $K^\sigma(\mathbf{r})$ и $K^\varepsilon(\mathbf{r})$ на первом этапе метода можно проводить при всех возможных значениях параметра микроструктуры h/R. Для каждого значения h/R вычислим средние значения

$$\left\langle K^\sigma(\mathbf{r})\right\rangle = V_т K^\sigma_т + V_{об} K^\sigma_{об};\ \left\langle K^\varepsilon(\mathbf{r})\right\rangle = V_т K^\varepsilon_т + V_{об} K^\varepsilon_{об}$$

и величины

$$\alpha_{ijkl}(\mathbf{r}) = \frac{K^\sigma_{ijkl}(\mathbf{r})}{\left\langle K^\sigma_{ijkl}(\mathbf{r})\right\rangle};\ \beta_{ijkl}(\mathbf{r}) = \frac{K^\varepsilon_{ijkl}(\mathbf{r})}{\left\langle K^\varepsilon_{ijkl}(\mathbf{r})\right\rangle},$$

позволяющие установить, во сколько раз отличаются значения компонент операторов $K^\sigma(\mathbf{r})$ и $K^\varepsilon(\mathbf{r})$ как во "внутреннем" жидком теле, так и в оболочке микрокапсул от средних значений $\left\langle K^\sigma_{ijkl}(\mathbf{r})\right\rangle$ и $\left\langle K^\varepsilon_{ijkl}(\mathbf{r})\right\rangle$ соответствующих компонент.

Поскольку значения компонент операторов $K^\sigma(\mathbf{r})$ и $K^\varepsilon(\mathbf{r})$ для микрокапсул на втором этапе вычисляют с использованием их эффективных модулей упругости (определенных на первом этапе), то для вычисления компонент тензоров концентрации во "внутреннем" жидком теле и в оболочке микрокапсул эти вычисленные значения надо умножить соответственно на $\alpha_{ijkl}(\mathbf{r})$ и $\beta_{ijkl}(\mathbf{r})$.

Проведение модельных расчетов

Рассмотрим трехкомпонентный композит, изотропной матрицей которого служит фенилон марки С2 (модуль Юнга — 2822,4 МПа, коэффициент Пуассона — 0,21) [8]. Фенилоновый об-

sb318.indd 116 06.03.2018 8:59:07

разец наполнен сферическими микрокапсулами, капсулируемое вещество — глицерин, объемный модуль которого равен 4,4 ГПа [10]. Оболочки капсул — изотропный ароматический полиимид каптон марки DuPont Kapton®HN (модуль Юнга — 2,5 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,34) [11]. Для упрочнения композита в фенилоновую матрицу вносят изотропные дисперсные включения БЩС (модуль Юнга — 76,2 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,22) [8, 10].

При операциях над тензорами используют матричную форму записи [6]. Ненулевые элементы c_{ij} ($i, j = 1, ..., 6$) симметрической матрицы тензора c модулей упругости для изотропного материала выражают через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν:

$$c_{11} = c_{22} = c_{33} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)};$$

$$c_{44} = c_{55} = c_{66} = \frac{E}{2(1+\nu)};$$

$$c_{12} = c_{13} = c_{23} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}.$$

Учитывая, что характерный размер h/R может изменяться в пределах 0,2...0,85 [8], рассмотрим далее случай $h/R = 0{,}4$.

Важнейший момент ОСП — использование однородного тела сравнения, материальные константы которого входят в окончательные выражения для вычисления эффективных и локальных упругих характеристик неоднородного материала. Одним из широко применяемых подходов для вычисления параметров тела сравнения служит метод самосогласования [6]. На первом этапе этот метод использовали при проведении расчетов тензора эффективных упругих свойств c^* и операторов $K^\sigma(\mathbf{r})$, $K^\varepsilon(\mathbf{r})$ для микрокапсул. Для получения упругих характеристик c^c тела сравнения при фиксированном значении $h/R = 0{,}4$ организована итерационная процедура, в которой для его параметров брали значения тензора модулей упругости (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве нулевого приближения для параметров тела сравнения выбирали характеристики в приближении Фойгта $c_{\text{Voight}} = V_{\text{т}}c_{\text{т}} + V_{\text{об}}c_{\text{об}}$ [6]. Такой подход позволил проводить вычисления в двухкомпонентных композитах, имитирующих сферические микрокапсулы, "внутреннее" тело которых является жидкостью с объемным модулем, отличным от нуля, а модуль сдвига равен нулю. Во время проведения итерационной процедуры считалось, что включения жидкого смазывающего вещества имеют средний радиус $R = 1$. При вычислении по соотношению (3) компонент тензора $g(\mathbf{r})$ полагали, что $l_1 = l_2 = l_3 = R = 1$ для глицерина и $l_1 = l_2 = l_3 = h/2$ для каптона. Выход из итерационной процедуры осуществлялся, когда максимальная разница между модулями c^c составляла менее 0,01.

На втором этапе метода по соотношениям (5) и (6) проводили численные модельные расчеты тензоров $K^\sigma(\mathbf{r})$ и $K^\varepsilon(\mathbf{r})$ в трехкомпонентных трибокомпозитах на основе фенилоновой матрицы, со сферическими микрокапсулами (эффективные модули упругости при $h/R = 0{,}4$ вычислены на первом этапе) и дисперсными включениями БЩС. Для вычисления параметров тела сравнения, как и на первом этапе, применяли метод самосогласования [6]. При каждых значениях объемных концентраций компонентов трибокомпозитов осуществлялась итерационная процедура, в которой для параметров c^c тела сравнения выбирали значения тензора модулей упругости (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения брались упругие характеристики в приближении Хилла, т.е. средние арифметические значения, полученные в приближениях Ройсса $c_{\text{Reuss}} = \left[\sum_s V_s (c_s)^{-1}\right]^{-1}$ и Фойгта $c_{\text{Voight}} = \sum_s V_s c_s$ [6]. При вычислении по соотношению (3) компонент тензора $g(\mathbf{r})$ полагали, что $l_1 = l_2 = l_3 = 1$ для всех элементов неоднородности модельных трибокомпозитов. Выход из итерационной процедуры осуществляли, когда максимальная разница между модулями c^c составляла менее 0,01.

При проведении модельных расчетов второго этапа установлены зависимости значений компонент операторов $K^\sigma(\mathbf{r})$ и $K^\varepsilon(\mathbf{r})$ от изменения объемных содержаний компонентов трибокомпозитов (при фиксированном характерном размере микрокапсул $h/R = 0{,}4$). Основное внимание уделено анализу зависимостей только компонент 1111 и 1212 этих операторов, которые в трибокомпозитах "отвечают" за работу при сжатии и сдвиге.

Результаты модельных расчетов представлены на рис. 2, 3. Цифры на кривых соответствуют компонентам операторов $K^\sigma(\mathbf{r})$ и $K^\varepsilon(\mathbf{r})$ в отдельных элементах неоднородности трибокомпозитов (*1* — глицерин, *2* — каптон, *3* — БЩС, *4* — фенилон).

Зависимости значений компонент 1111 операторов $K^\sigma(\mathbf{r})$ и $K^\varepsilon(\mathbf{r})$ при изменении объем-

sb318.indd 117 06.03.2018 8:59:07

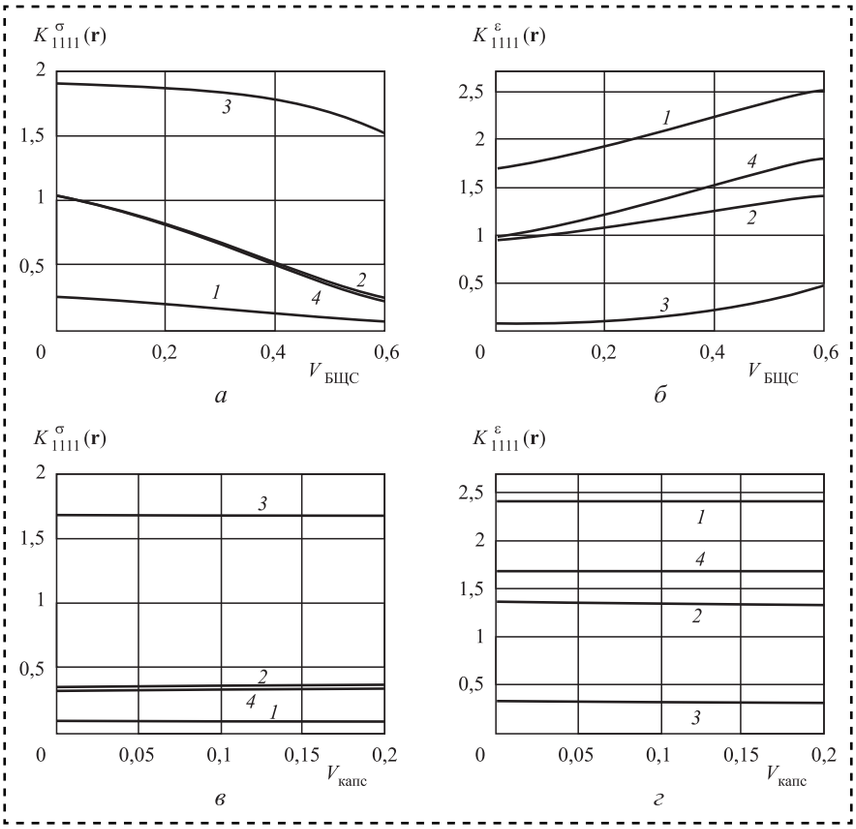


Рис. 2. Зависимости компонент 1111 операторов $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ (*а, в*) и $K^{\varepsilon}(\mathbf{r})$ (*б, г*) трибокомпозитов от изменения объемного содержания БЩС при концентрации микрокапсул, равной 0,1 (*а*, *б*), и от изменения объемного содержания микрокапсул при концентрации БЩС, равной 0,5 (*в*, *г*)

ного содержания наполнителей трибокомпозитов дают представление о влиянии компоненты 11 приложенного внешнего сжимающего воздействия (в направлении оси x) на внутренний "отклик" в том же направлении в каждом отдельном элементе неоднородности композита (см. рис. 2).

Зависимости значений компонент 1212 операторов $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ и $K^{\varepsilon}(\mathbf{r})$ при изменении объемного содержания наполнителей трибокомпозитов дают представление о влиянии компоненты 12 приложенного внешнего сдвигового воздействия (вдоль плоскости, образованной осями x и y) на внутренний "отклик" в том же направлении в каждом отдельном элементе неоднородности композита (см. рис. 3).

Заключение

На основании проведенных исследований зависимостей значений компонент 1111 и 1212 операторов $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ и $K^{\varepsilon}(\mathbf{r})$ от изменения объемного содержания компонентов трибокомпозитов при фиксированном характерном размере микрокапсул ($h/R = 0{,}4$) выявлено, что:

— увеличение объемного содержания включений БЩС приводит к уменьшению значений рассматриваемых компонент оператора $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ и к увеличению значений компонент оператора $K^{\varepsilon}(\mathbf{r})$ во всех элементах неоднородности трибокомпозитов (закон изменения нелинеен);

— вариация объемной концентрации микрокапсул в диапазоне, используемом на практике, приводит к несущественному изменению значений рассматриваемых компонент операторов $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ и $K^{\varepsilon}(\mathbf{r})$ во всех элементах неоднородности трибокомпозитов;

— значения компоненты 1212 оператора концентрации напряжений $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ во "внутреннем" жидком теле микрокапсул равны нулю, что подтверждает адекватность проведенного теоретического моделирования;

— значения компонент 11 и 12 тензора деформаций ε во "внутреннем" жидком теле от 1,7 до 3 раз превышают значения этих же компонент тензора $\langle\varepsilon\rangle$. Следовательно, при больших

sb318.indd 118 06.03.2018 8:59:08

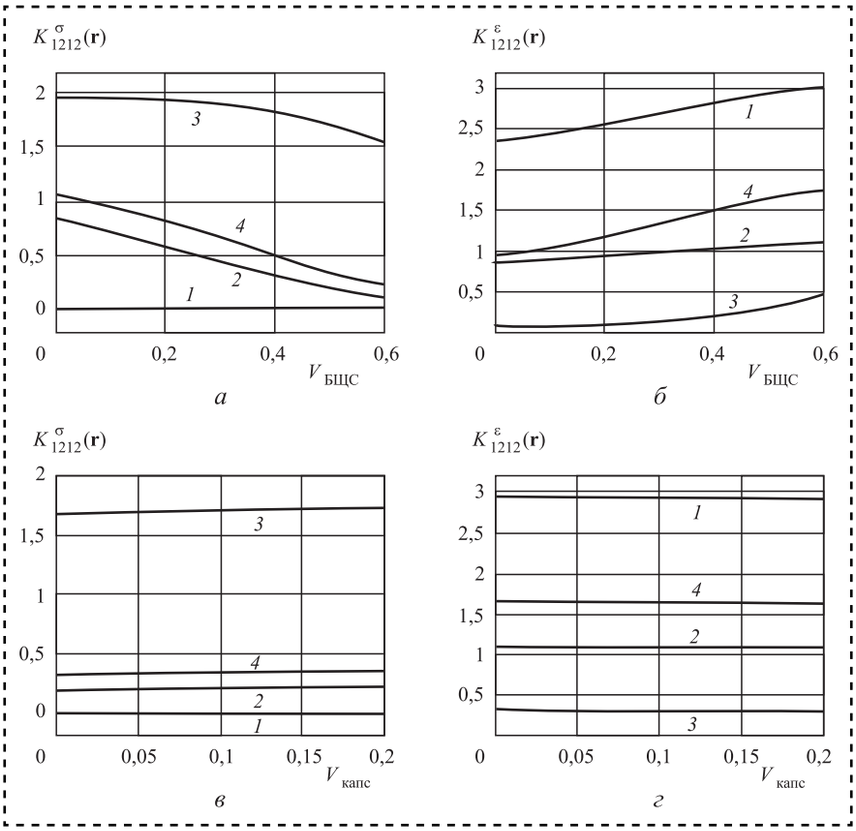


Рис. 3. Зависимости компонент 1212 операторов K^{σ}(r) (*а, в*) и K^{ε}(r) (*б, г*) трибокомпозитов от изменения объемного содержания БЩС при концентрации микрокапсул, равной 0,1 (*а*, *б*), и от изменения объемного содержания микрокапсул при концентрации БЩС, равной 0,5 (*в*, *г*)

механических нагрузках (одноосное сжатие или сдвиг) возможно разрушение оболочек микрокапсул с выделением смазки на поверхностях трения.

Библиографический список

1. **Солодовник В.Д.** Микрокапсулирование. М.: Химия, 1980. 216 с.
2. **Лопанов А.Н., Тихомирова К.В.** Физико-химические аспекты инженерии капсулирования. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 294 с.
3. **Бардушкин В.В., Сорокин А.И., Сычев А.П.** Моделирование эксплуатационных упругих свойств полимерных композитов с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 10. С. 43—47.
4. **Бардушкин В.В., Сорокин А.И., Сычев А.П.** Концентрация напряжений и деформаций в полимерных композитах с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла // Вестник РГУПС. 2016. № 1. С. 8—13.
5. **Бардушкин В.В., Сорокин А.И., Сычев А.П.** Моделирование предельных значений прочностных показателей полимерных композитов с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла // Вестник РГУПС. 2016. № 3. С. 8—13.
6. **Шермергор Т.Д.** Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
7. **Christensen R.M.** A critical evaluation of a class of micro-mechanics models // J. Mech. Phys. Solids. 1990. Vol. 38. P. 379—404.
8. **Прогнозирование** эксплуатационных упругих свойств трибокомпозитов с микрокапсулами, заполненными жидкой смазкой / В.И. Колесников и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. Т. 18. № 9. С. 398—403.
9. **Колесников В.И., Яковлев В.Б., Бардушкин В.В., Сычев А.П.** О прогнозировании распределений локальных упругих полей в неоднородных средах на основе обобщенного сингулярного приближения // Вестник Южного научного центра РАН. 2015. Т. 11. № 3. С. 11—17.
10. **Физические** величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
11. **Интернет-ресурс.** Режим доступа: http://www.dupont.com/content/dam/dupont/ products-and-services/membranes-and-films/polyimde-films/documents/DEC-Kapton-summary-of-properties.pdf.

sb318.indd 119 06.03.2018 8:59:08

УДК 531.43

В.В. Измайлов, *д-р техн. наук*
(Тверской государственный технический университет)
E-mail: iz2v@tvcom.ru

Влияние адгезионного взаимодействия на характеристики дискретного контакта технических поверхностей*

На основании теории адгезионного взаимодействия Джонсона, Кендалла и Робертса (ДКР) и теории дискретного контакта шероховатых поверхностей Н.Б. Демкина получены аналитические выражения для расчета деформации контакта и фактической площади контакта. Показано, что на наномасштабном уровне, особенно при малых контактных давлениях, необходимо учитывать влияние адгезионных сил на формирование контакта технических поверхностей.

On the grounds of the theory of adhesive interaction by Johnson, Kendall and Roberts (JKR) and the theory of discrete contact of rough surfaces by N.B. Demkin the analytical expressions for the calculation of a contact deformation and a real contact area have been obtained. It is shown that on the nanoscale level the influence of adhesive forces on the formation of engineering surfaces contact has to be taken into account, especially at low contact pressures.

Ключевые слова: дискретный контакт, наношероховатость, адгезия, контактная деформация, площадь контакта.

Keywords: discrete contact, nanoroughness, adhesion, contact deformation, contact area.

Введение

Освоение современными технологиями наномасштабного уровня привело, в частности, к бурному развитию нанотрибологии [1]. Необходимость учитывать масштабный фактор в трибологии требует развития как теоретических моделей, так и экспериментальных методик. Один из ключевых факторов, связанный с переходом на микро- и наномасштабный уровень — адгезионное взаимодействие контактирующих поверхностей. Существенная (порой и решающая) роль поверхностных сил в процессах контактного взаимодействия на микро- и наномасштабном уровнях заставила трибологов на рубеже XX и XXI веков вновь обратиться к основополагающим теориям адгезионного взаимодействия, разработанным еще в прошлом веке и известным как теория Дерягина—Муллера—Топорова (ДМТ, 1975 г.) и Джонсона—Кендалла—Робертса (ДКР, 1971 г.). Несмотря на то, что более поздние работы развивают и уточняют эти теории, они не утратили актуальности до настоящего времени, их широко цитируют и используют в современных теоретических моделях [2]. Сочетание молекулярных адгезионных и механических моделей дискретного контакта реальных технических поверхностей — актуальная задача трибологии, особенно на микро- и наномасштабном уровнях [1].

Цель работы — аналитическое описание множественного дискретного контакта технических поверхностей с учетом сил адгезии с использованием теории адгезионного взаимодействия ДКР.

Расчет характеристик дискретного адгезионного контакта с использованием теории ДМТ подробно проанализирован в работе [3].

Постановка задачи

Предложенная аналитическая модель дискретного адгезионного контакта основана на двух моделях: адгезионного взаимодействия ДКР и дискретного контакта шероховатых поверхностей Н.Б. Демкина [4] (рис. 1).

В целях упрощения аналитических преобразований контакт двух шероховатых поверхностей

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17-08-00614).

sb318.indd 120 06.03.2018 8:59:08

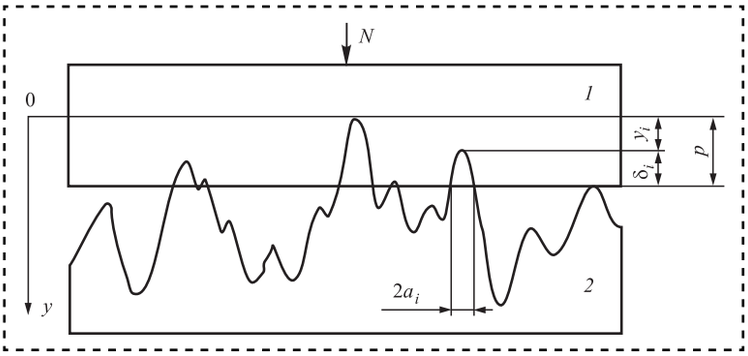


Рис. 1. Контакт гладкой детали *1* с шероховатой деталью *2*:
p — деформация контакта (сближение контактирующих поверхностей); *y* — координата, отсчитанная от вершины наиболее высокой неровности (от линии выступов)

заменен контактом гладкой поверхности (штампа) *1* с шероховатой поверхностью *2*, имеющей эквивалентные характеристики шероховатости.

Неровности реальной поверхности (микро- или наношероховатость) моделируют сферическими сегментами, имеющими одинаковый радиус кривизны *r*, равный среднему значению по всему ансамблю контактирующих неровностей.

В модели ДКР связь между нормальной силой N_i (часть общей нормальной нагрузки, приходящейся на *i*-ю неровность) и радиусом единичной площадки контакта a_i выражается формулой

$$N_i = \frac{4E^* a_i^3}{3r} - 2\sqrt{2\pi E^* \gamma a_i^3}, \qquad (1)$$

а связь между деформацией единичной неровности δ_i и радиусом единичной площадки a_i имеет вид:

$$\delta_i = \frac{a_i^2}{r} - \sqrt{\frac{2\pi a_i \gamma}{E^*}}, \qquad (2)$$

где E^* — эквивалентный модуль упругости, $E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)^{-1}$; $E_{1,2}$ и $\mu_{1,2}$ — модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих деталей;

γ — энергия (работа) адгезии [2].

В общем случае

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12},$$

где γ_1 и γ_2 — поверхностные энергии контактирующих тел;

γ_{12} — энергия межфазной границы.

Для одинаковых идеально сопряженных кристаллических решеток и атомарно чистых поверхностей контактирующих тел $\gamma_{12} = 0$, $\gamma_1 = \gamma_2$ и $\gamma = 2\gamma_1$.

Общая нормальная нагрузка, воспринимаемая контактом, находится как сумма нагрузок на отдельные контактирующие неровности:

$$N = \int_{n_r} N_i dn_r, \qquad (3)$$

где n_r — число контактирующих неровностей.

При отсутствии адгезионного взаимодействия ($\gamma = 0$) формулы (1) и (2) закономерно превращаются в соответствующие зависимости теории Г. Герца для контакта гладких упругих тел, ограниченных поверхностями второго порядка кривизны:

$$N_i = \frac{4E^* a_i^3}{3r} \text{ и } \delta_i = \frac{a_i^2}{r}.$$

Безразмерные соотношения для характеристики адгезионного контакта

Введем безразмерные параметры контакта:

$$\tilde{a} = \frac{a}{a_0}; \ \tilde{\delta} = \frac{\delta}{\delta_0}; \ \tilde{N} = \frac{N}{N_0},$$

где $a_0 = \left(\frac{9\pi r^2 \gamma}{2E^*}\right)^{1/3}$; $\delta_0 \left(\frac{3\pi^2 r \gamma^2}{2E^{*2}}\right)^{1/3}$; $N_0 = \frac{2}{\sqrt{3}}\pi r \gamma$.

Величины a_0 и δ_0 в теории ДКР соответствуют радиусу площадки контакта и контактной деформации при нулевой внешней нагрузке, т.е. при действии только силы адгезии. Величина N_0 характеризует силу адгезии.

В безразмерных величинах уравнения (1) и (2) принимают вид:

$$\tilde{N} = 3\sqrt{3}\left(\tilde{a}^3 - \tilde{a}^{3/2}\right); \qquad (4)$$

$$\tilde{\delta} = 3\tilde{a}^2 - 2\sqrt{\tilde{a}}. \qquad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) следует связь внешней контактной нагрузки и деформации единичного контакта в безразмерной форме:

$$\tilde{N} = \left(\tilde{\delta}\right)^{3/2} - 1. \qquad (6)$$

Подставив в уравнение (6) выражения для N_0 и δ_0, получим значения в абсолютных величинах:

$$N = \frac{4}{3}E^*\sqrt{r}\delta^{3/2} - \frac{2}{\sqrt{3}}\pi r \gamma. \qquad (7)$$

sb318.indd 121 06.03.2018 8:59:09

При отсутствии адгезии ($\gamma = 0$) $N = \frac{4}{3} E^* \sqrt{r} \delta^{3/2}$, что соответствует герцевскому контакту.

Расчет деформации контакта

На основании формул (3) и (7), учитывая, что $dn_r = n_m \nu (\nu - 1) \left(\frac{y}{R_p} \right)^{\nu - 2} d \left(\frac{y}{R_p} \right)$ [4], имеем

$$N = \int_{n_r} N_i dn_r = n_m \nu (\nu - 1) \times$$

$$\times \int_0^p \left(\frac{4}{3} E^* \sqrt{r} (p - y)^{3/2} - \frac{2}{\sqrt{3}} \pi r \gamma \right) \left(\frac{y}{R_p} \right)^{\nu - 2} d \left(\frac{y}{R_p} \right),$$

где n_m — число неровностей выше средней плоскости шероховатости;

R_p — наибольшая высота неровностей над средней плоскостью;

ν — параметр степенной аппроксимации кривой опорной поверхности;

y — координата;

p — деформация контакта (см. рис. 1).

Параметр ν характеризует распределение материала по высоте шероховатого слоя и является одной из основных характеристик шероховатой поверхности в модели Н.Б. Демкина (под термином шероховатость понимается как микро-, так и наношероховатость).

Выполнив интегрирование [4], получим

$$N = n_m \nu (\nu - 1) B \left(\frac{5}{2}; \nu - 1 \right) \frac{4}{3} E^* \sqrt{R_p^3 r} \varepsilon^{\nu + 1/2} -$$

$$- n_m \nu \frac{2}{\sqrt{3}} \pi r \gamma \varepsilon^{\nu - 1},$$

где $B \left(\frac{5}{2}; \nu - 1 \right)$ — бета-функция;

$\varepsilon = \frac{p}{R_p}$ — относительная деформация контакта (относительное сближение контактирующих поверхностей).

Обозначая $K_1 = \nu (\nu - 1) B \left(\frac{5}{2}; \nu - 1 \right)$ и подставляя число неровностей выше уровня средней плоскости $n_m = \frac{A_n t_m}{2 \pi r R_p}$ [4], окончательно имеем

$$p_n = \frac{N}{A_n} = t_m \left(\frac{2 K_1}{3 \pi} E^* \sqrt{\frac{R_p}{r} \varepsilon^{\nu + 1/2} - \frac{\nu \gamma}{\sqrt{3} R_p} \varepsilon^{\nu - 1}} \right), \quad (8)$$

где A_n — номинальная (геометрическая) площадь контакта;

p_n — номинальное контактное давление;

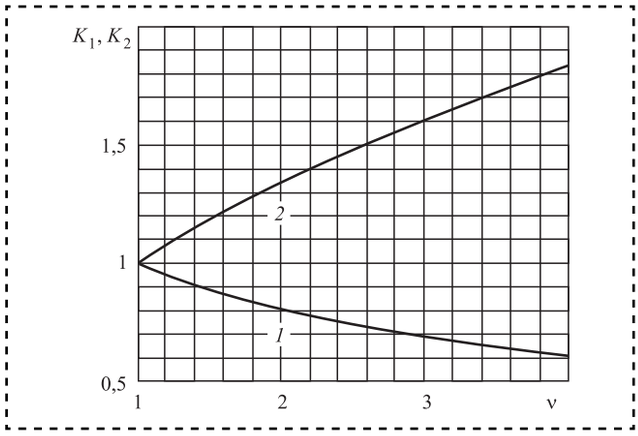


Рис. 2. Значения коэффициентов K_1 (*1*) и K_2 (*2*)

t_m — относительная опорная длина профиля на уровне средней линии, совпадающая с относительной опорной площадью на уровне средней плоскости шероховатости.

Значения коэффициента K_1 приведены на рис. 2 в зависимости от параметра степенной аппроксимации кривой опорной поверхности ν.

Таким образом, уравнение (8) характеризует деформационные свойства контакта (фактически его жесткость) в зависимости от топографии контактирующих поверхностей (параметры R_p/r и ν), упругих свойств материалов контактирующих деталей и энергии адгезии.

Фактическая площадь контакта

Важнейшая характеристика контакта — фактическая площадь контакта A_r, образованная совокупностью площадок контакта отдельных неровностей ΔA_{ri}. Именно фактическая площадь контакта определяет многие его характеристики: силу трения, контактные электро- и теплопроводность и др. В многоуровневом дискретном контакте (микрошероховатость + наношероховатость) расчет фактической площади контакта иногда более важен, чем расчет деформации. Деформация контакта — аддитивная характеристика

$$\delta = \delta_m + \delta_n,$$

где δ_m — деформация микрошероховатости;

δ_n — деформация наношероховатости,

тогда относительная площадь контакта мультипликативная

$$\eta_r = A_r / A_n,$$

где $\eta_r = \eta_{rm} \eta_{rn}$.

В силу соотношения высот неровностей микро- и наношероховатости, очевидно, $\delta_n \ll \delta_m$,

sb318.indd 122 06.03.2018 8:59:09

поэтому во многих случаях можно считать $\delta \approx \delta_m$. В случае относительной площади контакта величины η_{rm} и η_{rn} обычно одного порядка, и ни одним из сомножителей пренебречь нельзя.

Взаимосвязь деформации и фактической площади контакта описывается так называемой кривой опорной поверхности, или кривой Аббота [4]. В относительных величинах начальный участок кривой опорной поверхности обычно хорошо аппроксимируется степенной функцией

$$\eta_s = t_m \varepsilon^{\nu},$$

где $\eta_s = A_s/A_n$;

A_s — суммарная площадь сечения всех неровностей шероховатости на заданном уровне.

Строго говоря, A_s — чисто геометрическая величина, она отличается от фактической площади контакта A_r. Например, для герцевского контакта $A_r = 0{,}5A_s$. Коэффициент 0,5 отражает тот факт, что площадь контакта сферической неровности в теории Герца $\Delta A_{ri} = \pi a_i^2 = \pi r\delta$, тогда как площадь сечения той же неровности $\Delta A_{si} \approx 2\pi r\delta$. Таким образом, деформационная кривая опорной поверхности, в отличие от геометрической, может быть записана в виде $h_r = at_m\varepsilon^{\nu}$. Для герцевского контакта и модели адгезионного контакта ДМТ $\alpha = 0{,}5$.

Для модели ДКР зависимость $\delta(a_i)$ (формула (2)) отличается от герцевской наличием второго слагаемого, поэтому приведенные выше формулы для описания деформационной кривой опорной поверхности неприменимы. В связи с этим необходимо получить выражение для деформационной кривой опорной поверхности на основе теории ДКР. Из формул (2) или (5) нельзя получить достаточно простой зависимости $\Delta A_{ri}(\delta) = \pi a_i^2(\delta)$. Однако теоретический анализ показывает, что с погрешностью не более 2 % во всем диапазоне реальных значений деформаций контакта справедлива аппроксимация

$$\tilde{a}^2 = \frac{1}{2} + \frac{\tilde{\delta}}{3} + \frac{\tilde{\delta}^{1/2}}{6}. \qquad (9)$$

Подставив в формулу (9) выражения для a_0 и δ_0 и перейдя к абсолютным величинам, получим зависимость площади единичной площадки контакта от деформации контактирующих неровностей

$$\Delta A_{ri} = \pi a_i^2 = \pi r\delta_i + 0{,}7\pi r\left(\frac{\gamma r^{1/2}}{E^*}\right)^{1/3}\delta_i^{1/2} + 3\pi\left(\frac{\gamma r^2}{E^*}\right)^{2/3}.$$

Общую площадь фактического контакта найдем суммированием единичных площадок контакта всех контактирующих неровностей:

$$A_r = \int_{n_r} \Delta A_{ri} dn_r = n_m \nu(\nu - 1)\int_{n_r} \Delta A_{ri}\left(\frac{y}{R_p}\right)^{\nu-2} d\left(\frac{y}{R_p}\right).$$

Выполняя интегрирование, получим выражение для относительной площади фактического контакта η_r

$$\eta_r = \frac{A_r}{A_n} = 0{,}5t_m\varepsilon^{\nu} \times$$
$$\times\left[1 + 0{,}7K_2\left(\frac{\gamma}{E^*R_p}\right)^{1/3}\left(\frac{r}{R_p}\right)^{1/6}\varepsilon^{-1/2} + \right. \qquad (10)$$
$$\left. + 3\nu\left(\frac{\gamma}{E^*R_p}\right)^{2/3}\left(\frac{r}{R_p}\right)^{1/3}\varepsilon^{-1}\right],$$

где $K_2 = \nu(\nu - 1)B\left(\frac{3}{2};\ \nu - 1\right)$.

Значения коэффициента K_2 приведены на рис. 2 в зависимости от параметра ν.

При отсутствии адгезии ($\gamma = 0$) формула (10) описывает деформационную кривую опорной поверхности для герцевского контакта шероховатых тел $\eta_r = \alpha t_m\varepsilon^{\nu}$.

Формулы (8) и (10) в параметрическом виде выражают связь относительной площади фактического контакта η_r с номинальным контактным давлением p_n. В качестве параметра выступает относительная деформация контакта ε.

Обсуждение полученных результатов

Проиллюстрируем влияние адгезионных сил на основные характеристики контакта на примере поверхностей с характеристиками наношероховатости: $R_p = 10$ нм, $r = 200$ нм, $t_m = 0{,}5$, $\nu = 2...3$. Они соответствуют типичным параметрам рабочих поверхностей стальных концевых мер длины (плитки Иогансона) и определены с помощью атомного силового микроскопа. Приведенный модуль упругости для контакта стальных поверхностей $E^* = 10^{11}$ Па.

Влияние адгезионных сил на форму деформационной кривой опорной поверхности показано на рис. 3. Отсчет относительного сближения поверхностей (относительной деформации контакта) ведется от вершины наиболее высокого выступа (см. рис. 1). Практический интерес представляет верхняя часть кривых, так как величины относительных деформаций $\varepsilon \to 1$ (уровень средней плоскости) в реальном контакте недостижимы. При больших деформациях сказывается

sb318.indd 123 06.03.2018 8:59:09

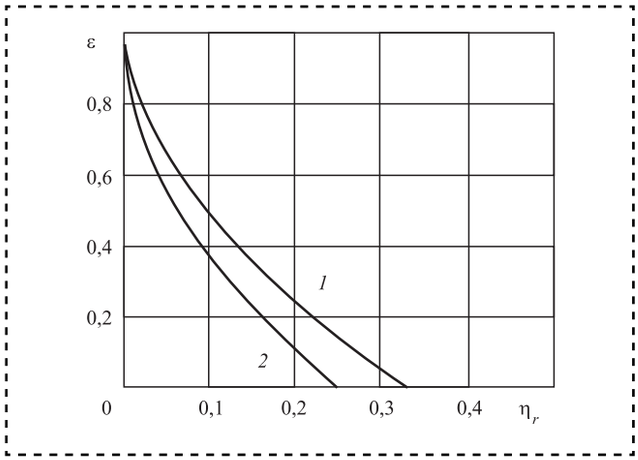


Рис. 3. Деформационные кривые опорной поверхности (ν = 2):
1 — при наличии адгезионного взаимодействия (γ = 1 Дж/м^2); *2* — при его отсутствии (γ = 0)

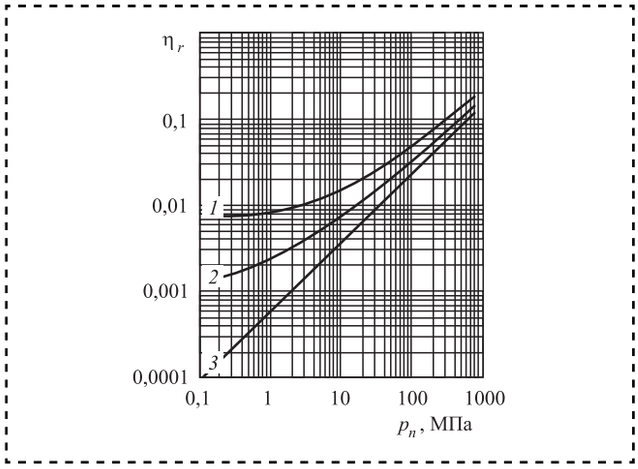


Рис. 4. Влияние адгезионного взаимодействия на относительную площадь фактического контакта (ν = 2):
1 — γ = 1 Дж/м^2; *2* — γ = 0,25 Дж/м^2; *3* — γ = 0 (герцевский контакт)

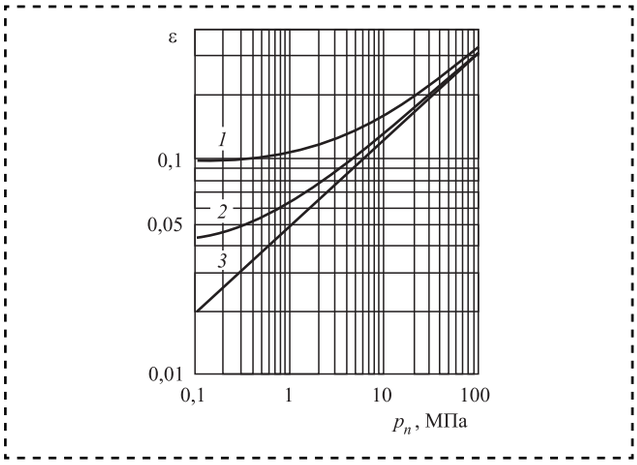


Рис. 5. Влияние адгезионного взаимодействия на относительную деформацию контакта (ν = 2):
1 — γ = 1 Дж/м^2; *2* — γ = 0,25 Дж/м^2; *3* — γ = 0 (герцевский контакт)

взаимное влияние соседних неровностей, их деформация перестает быть независимой, что приводит к росту фактического контактного давления вплоть до бесконечности. К тому же весьма вероятно наступление пластической деформации неровностей. В силу этих причин нарушаются исходные предпосылки данного анализа.

Из рис. 3 видно, что адгезионное взаимодействие приводит к увеличению относительной площади фактического контакта по сравнению с герцевским контактом при тех же деформациях.

Роль адгезионного взаимодействия контактирующих поверхностей в формировании фактической площади контакта иллюстрирует рис. 4. Это влияние существенно сказывается при малых контактных давлениях и при сравнительно больших значениях энергии адгезии. При малых контактных давлениях значения фактической площади контакта адгезионного и герцевского контактов могут отличаться более чем на порядок.

Влияние адгезионного взаимодействия на величину относительной деформации контакта по характеру аналогично влиянию на относительную площадь фактического контакта, но выражено слабее (рис. 5). Уже при p_n = 10 МПа это влияние становится незначительным, особенно при небольших значениях энергии адгезии.

Сравнение результатов расчетов характеристик дискретного адгезионного контакта на основе мо-

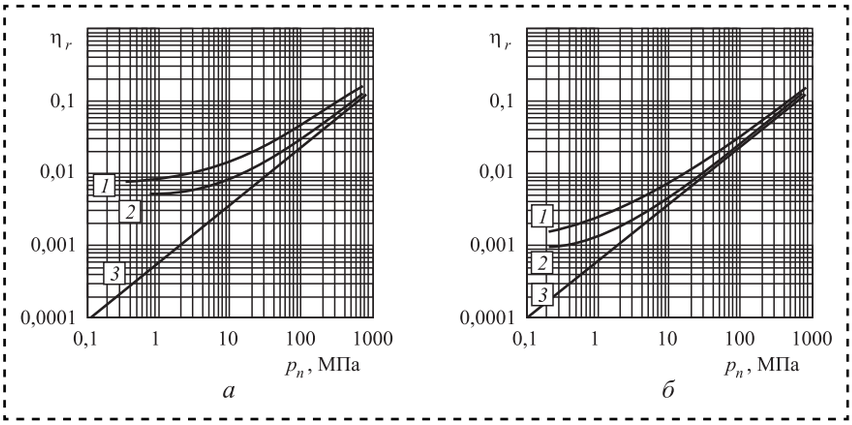


Рис. 6. Сравнение величин относительной фактической площади контакта, рассчитанных на основании теорий ДКР (*1*), ДМТ (*2*) и Г. Герца (*3*):
а — γ = 1 Дж/м^2; *б* — γ = 0,25 Дж/м^2

sb318.indd 124 06.03.2018 8:59:10

делей, использующих для учета влияния адгезии теории ДКР и ДМТ, представлено на рис. 6.

Характер зависимостей $\eta_r(p_n)$ для адгезионного контакта схожий, как при использовании в расчетах теории ДКР, так и теории ДМТ, но в первом случае расчеты дают бóльшие значения относительной площади контакта. Разница может достигать 70 %, уменьшаясь с ростом контактного давления.

Величины энергии адгезии γ = 1...3 Дж/м^2 и более характерны для атомарно чистых поверхностей металлических материалов. Наличие адсорбента на поверхности существенно снижает энергию адгезии. Для ван-дер-ваальсовых сил энергия адгезии $\gamma \approx 0{,}1$ Дж/м^2. Исходя из этого выбраны величины энергии адгезии, использованные в приведенных примерах расчетов характеристик контакта.

Заключение

Теоретический анализ влияния адгезионных сил на основные характеристики дискретного контакта технических поверхностей показал, что при малых контактных давлениях p_n < 10 МПа это влияние играет заметную роль. Игнорирование адгезионных сил может привести к погрешности, например, в расчете фактической площади контакта в 100 % и более в зависимости от энергии адгезии.

Полученные результаты могут быть полезны при разработке современных миниатюрных технических устройств, в частности, так называемых микроэлектромеханических систем (МЭМС), а также при разработке экспериментальных методик и интерпретации экспериментальных результатов по прямому измерению сил адгезии в контакте, измерению сверхмалых сил трения, при микро- и наноиндентировании, исследовании мономолекулярных граничных слоев, и в других трибологических исследованиях на микро- и наномасштабном уровне.

Библиографический список

1. **Мышкин Н.К., Ткачук Д.В., Свириденок А.И.** Тенденции в развитии трибологии // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 1. С. 3—10.

2. **Barthell E.** Adhesive elastic contact — JKR and more // Journal of Physics D: Applied Physics. 2008. T. 41. № 1.

3. **Измайлов В.В.** Расчет характеристик дискретного адгезионного контакта // Трение и износ. 2014. Т. 35, № 5. С. 518—527.

4. **Измайлов В.В., Новоселова М.В.** Контакт твердых тел и его проводимость. Тверь: ТГТУ, 2010. 112 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

sb318.indd 125 06.03.2018 8:59:10

УДК 621.891

А.И. Иргашев, *д-р техн. наук,* **Б.А. Иргашев**
(Ташкентский государственный технический университет)
E-mail: irgashevamirkul@mail.ru

Оценка допустимой длины зубьев шестерен закрытых агрегатов при заданной износостойкости

Рассмотрена методика расчета допустимой и расчетной длины зубьев, учитывающая износостойкость материала шестерен, работающих в условиях наличия между зубьями проскальзывания при наличии и отсутствии в масле агрегата абразивных частиц в зависимости от модуля зацепления, передаточного отношения зубчатой передачи, твердости, предела текучести материала шестерен и контактного напряжения в зацеплении.

The method of calculating the permissible and the estimated length of the teeth sensitive wear-resistant materialashesteren working in conditions of presence between the teeth of the slip, in the presence and absence in the oil unit of the abrasive particles, depending on the engagement module, the transmission ratio of the gear hardness chapel strength of the material of gears and contact stress in engagement.

Ключевые слова: длина зуба, износостойкость, проскальзывание, абразивные частицы, модуль зацепления, передаточное отношение, твердость, предел текучести, контактное напряжение.

Keywords: length of tooth, wearability, slippage, abrasive particle, module, engagement unit gear ratio, hardness, yield stress, contact stress.

При проектировании зубчатых передач длину зубьев шестерен определяют исходя из прочности на изгиб и контактных нагрузок, при этом не учитывая рабочую среду и комплексные конструктивные параметры зубчатых зацеплений, влияющих на износостойкость зубьев шестерен.

Цель работы — получение закономерностей изменения допустимой длины зубьев шестерен в закрытом агрегате, обеспечивающих заданную износостойкость зубьев шестерен при наличии и отсутствии в масле агрегата абразивных частиц в зависимости от модуля зацепления, передаточного отношения, твердости, предела текучести материала шестерен и контактного напряжения в зубчатой передаче.

Допустимая длина зуба шестерен в зависимости от режима работы зубчатой передачи [1]:

$$L = \psi_m m, \tag{1}$$

где m — модуль зацепления;

ψ_m — коэффициент, зависящий от режима работы зубчатой передачи.

Для высоконагруженной точной зубчатой передачи, валов, опор и корпуса повышенной точности ψ_m = 45...30, для расчета допустимой длины зубьев ψ_m = 36 [1].

В закрытых зубчатых передачах, работающих в условиях качения и при наличии проскальзывания между зубьями шестерен, когда в процессе изнашивания участвуют абразивные частицы, для определения расчетной длины зуба шестерни получена зависимость [2—4]:

$$L = \frac{22,33\sigma_a^2 \Gamma_{\text{ш,к}} \sqrt{\varepsilon_k^3} \sqrt{\gamma_{\text{м}}} k_v d_{\text{ср}} n_{\text{ш,к}} m}{\gamma_{\text{а ш,к}} i H_{\text{ш,к}}^2 \sqrt{\gamma_{\text{а}}} n_{\text{р(ш,к)}} z_k \psi}, \tag{2}$$

где m — модуль зацепления зубчатой передачи;

i — передаточное отношение зубчатой передачи;

$H_{\text{ш,к}}$ — твердость материала шестерен;

$z_{\text{к}}$ — число зубьев ведомой шестерни;

σ_a — прочность абразивных частиц на сжатие;

$\Gamma_{\text{ш,к}}$ — соотношение твердости материала шестерни и прочности абразивных частиц;

$\varepsilon_к$ — концентрация абразивных частиц в масле агрегата [5];

$\gamma_{\text{м}}$ — плотность масла;

sb318.indd 126 06.03.2018 8:59:10

$d_{ср}$ — средний размер абразивных частиц, участвующих в процессе изнашивания;

$n_{ш,к}$ — частота вращения шестерен;

k_v — коэффициент, учитывающий высоту зацепления относительно делительной окружности ведущей шестерни;

$\gamma_{аш,к}$ — скорость изнашивания зубьев шестерен при наличии в масле агрегата абразивных частиц;

$n_{р(ш,к)}$ — число циклов нагружения, приводящее к разрушению деформированного объема металла шестерен; $\gamma_а$ — плотность абразивной частицы.

Если закрытая зубчатая передача работает в условиях отсутствия в масле агрегата абразивных частиц и между зубьями шестерен происходит проскальзывание, то для расчета длины зуба шестерни предложена зависимость [2—4]:

$$L = \frac{2055 n_{ш,к} \sigma_н^4 \rho_{пр}{}^2 \theta_{ш,к}}{C i z_к E_{пр}^2 n_{р(ш,к)} \sigma_{т(ш,к)} \gamma_{д(ш,к)} \psi}, \quad (3)$$

где $\sigma_н$ — контактное напряжение между зубьями шестерен;

$\theta_{ш,к}$ — упругая постоянная материала шестерен;

$E_{пр}$ — приведенный модуль упругости материала шестерен;

$\gamma_{д(ш,к)}$ — скорость изнашивания зубьев шестерен, при отсутствии в масле агрегата абразивных частиц;

C — коэффициент деформации;

$\sigma_{т(ш,к)}$ — предел текучести материала шестерен;

ψ — коэффициент относительного проскальзывания;

$\rho_{пр}$ — приведенный радиус кривизны профиля зубьев шестерен зоны контакта,

$$\rho_{пр} = \frac{m z_{пр}}{2}, \quad (4)$$

где $z_{пр}$ — приведенное число зубьев шестерен, $z_{пр} = \frac{z_к z_ш}{z_ш + z_к} = \frac{z_к}{i+1}$;

$z_ш$ — число зубьев ведущей шестерни.

Предельный износ зубьев шестерен агрегатов трансмиссии машин [6] равен 0,25 мм. При этом полный ресурс до выбраковки шестерни с модулем зацепления m = 0,010 м составляет 24 000 ч, где средняя скорость изнашивания зубьев шестерен по толщине $\gamma_ш = 3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч.

Для расчета длины зуба шестерен использовали исходные данные: $\sigma_а$ = 750 МПа; ε_k = 0,246 %; i = 2; $Н_{ш,к}$ = 3000 МПа; Г = 3,299; $\gamma_а$ = 2,1 т/м^3; $\gamma_м$ = 0,91 т/м^3; $z_ш$ = 19; $z_к$ = 38; $n_{р(ш,к)}$ = 10,3; $d_{ср}$ = 0,0000115 м; $n_ш$ = 1800 ч$^{-1}$; k_v = 0,9; $\sigma_н$ = 11 000 МПа; $\theta_{ш,к} = 4{,}23 \cdot 10^{-6}$ 1/МПа; C = 3; $E_{пр}$ = 215 000 МПа; $\sigma_т$ = 1000 МПа; ψ = 0,772.

Оценка длины зубьев шестерен в зависимости от модуля зацепления при заданной скорости изнашивания зубьев [4, 7]

Предположим, что зубчатая передача агрегата работает в масле, содержащем абразивные частицы размером 0,00115 м, концентрацией 0,246 %. Согласно расчетным данным, полученным по выражению (2) и приведенным в табл. 1, допустимая и расчетная длина зуба шестерен по мере повышения модуля зацепления растет. Так, повышение модуля зацепления с 0,002 до 0,016 м приводит к повышению допустимой и расчетной длины зуба при скорости изнашивания $3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч в масле с абразивными частицами в 8 раз. Такая же расчетная закономерность получена при отсутствии в масле абразивных частиц.

Исходные данные для расчета, характеризующие условия работы зубчатой передачи, учи-

Таблица 1

Изменение длины зубьев шестерен в зависимости от модуля зацепления

Длина зуба, м	Модуль зацепления, м					
	0,002	0,003	0,006	0,010	0,012	0,016
С участием абразивных частиц						
Допустимая	0,072	0,108	0,216	0,360	0,432	0,576
Расчетная при скорости изнашивания $3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч	0,069	0,104	0,208	0,346	0,415	0,554
Без участия абразивных частиц						
Допустимая	0,072	0,108	0,216	0,360	0,432	0,576
Расчетная при скорости изнашивания $3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч	0,066	0,099	0,199	0,331	0,397	0,530

sb318.indd 127 06.03.2018 8:59:10

тывали: геометрические и кинематические параметры зацепления; механические свойства материала шестерен; размеры и концентрации абразивных частиц в масле агрегата, где работает данная зубчатая передача с заданными конструктивными параметрами.

Результаты расчета длины зубьев шестерен показывают, что в процессе проектирования зубчатых передач для уменьшения длины зубьев шестерен необходимо применять зацепления с наименьшим модулем, независимо от наличия и отсутствия в масле агрегата абразивных частиц. Причем расчетная длина зубьев шестерен, работающих в абразивной среде, на 4 % больше длины зубьев, работающих в чистом масле независимо от модуля зацепления.

Определение длины зубьев шестерен в зависимости от передаточного отношения [3]

Увеличение передаточного отношения с 1,6 до 8,00 приводит к уменьшению допустимой и расчетной длины зубьев шестерен в 5 раз (табл. 2). Когда скорость изнашивания зубьев по толщине составляет $3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч, износ зубьев шестерен по толщине равен 0,25 мм, независимо от вида изнашивания и присутствия абразивных частиц. Расчетные длины зубьев шестерен при износе зубьев шестерен с участием абразивных частиц на 4,59 % больше, чем без их участия. Расчетная длина зуба на 3,93 % меньше допустимой длины зубьев при износе с участием абразивных частиц. Если в масле агрегата отсутствуют абразивные частицы, то расчетная длина зубьев шестерни меньше допустимой длины на 8,70 %.

Оценка длины зубьев в зависимости от механических свойств материала шестерен и контактной нагрузки в зубчатой передаче [3]

В табл. 3 приведены расчетные значения допустимой и расчетной длины зубьев шестерен в зависимости от твердости зубьев при износе зубьев с участием абразивных частиц от предела текучести и контактного напряжения, когда в процессе изнашивания не участвуют абразивные частицы.

Результаты расчета показывают, что зубчатые колеса с более высокой твердостью и износостойкостью имеют более низкую расчетную длину зубьев.

С повышением твердости зубьев от 2000 до 7000 МПа допустимая и расчетная длины зубьев снижаются в 4,1 раза. Так, при твердости 2000 МПа длина зубьев уменьшается на 1,39 %; при 3000 МПа — на 4,05 %; при 4000 МПа — на 18,35 %; при 5000 МПа — на 31,55 % и при 6000 МПа — на 17,42 %. Это связно с тем, что с повышением твердости изменяются значения соотношения твердости материала шестерни и прочности абразивных частиц $\Gamma_{ш,к}$ а также число циклов нагружения, приводящих к разрушению деформированного объема металла ведущей (ведомой) шестерни $n_{р(ш,к)}$. Для расчета $\Gamma_{ш,к}$ в зависимости от значения твердости материала шестерен получена зависимость [4]:

$$\Gamma_{ш,к} = \frac{3\sqrt{H_{ш,к}\sigma_а - \sigma_а^2}}{Н_{ш,к}} + 4\sqrt{\frac{\sigma_а}{Н_{ш,к}}}. \qquad (5)$$

При σ = 750 МПа, когда значения твердости 2000; 3000; 4000; 5000; 6000 и 7000 МПа, расчет-

Таблица 2

Изменение длины зуба шестерен в зависимости от передаточного отношения

Длина зуба, м	Передаточное отношение							
	1,60	2,00	2,50	3,15	4,00	5,00	6,30	8,00
С участием абразивных частиц								
Допустимая	0,450	0,360	0,288	0,229	0,180	0,144	0,114	0,090
Расчетная при скорости изнашивания $3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч	0,433	0,346	0,269	0,220	0,173	0,138	0,110	0,087
Без участия абразивных частиц								
Допустимая	0,450	0,360	0,288	0,229	0,180	0,144	0,114	0,090
Расчетная при скорости изнашивания $3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч	0,414	0,331	0,265	0,210	0,166	0,132	0,105	0,083

sb318.indd 128 06.03.2018 8:59:10

Таблица 3

Допустимые и расчетные длины зубьев шестерен при скорости изнашивания $3{,}272 \cdot 10^{-8}$, м/ч, в зависимости от механических свойств материала и контактной нагрузки в зубчатой передаче

Твердость материала зубчатых колес, МПа	Допустимая длина зуба, м	Расчетная длина зуба при скорости изнашивания $3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч
С участием абразивных частиц		
2000	0,665	0,659
3000	0,360	0,346
4000	0,258	0,218
5000	0,221	0,168
6000	0,182	0,155
7000	0,163	0,180
Предел текучести материала шестерен, МПа	Допустимая длина зуба, м	Расчетная длина зуба при скорости изнашивания $3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч
Без участия абразивных частиц		
800	0,570	0,523
850	0,505	0,463
900	0,447	0,412
950	0,400	0,368
1000	0,360	0,331
1050	0,325	0,299
1100	0,295	0,271
1150	0,268	0,247
Контактное напряжение в зубчатой передаче, МПа	Допустимая длина зуба, м	Расчетная длина зуба при скорости изнашивания $3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч
Без участия абразивных частиц		
7000	0,059	0,054
8000	0,101	0,093
9000	0,161	0,148
10 000	0,246	0,226
11 000	0,360	0,331
12 000	0,510	0,469
13 000	0,702	0,645

ные значения $\Gamma_{ш,к}$ соответственно составляют: 3,901; 3,299; 2,903; 2,620; 2,406 и 2,237.

Значение $n_{р(ш,к)}$ определяется по выражению [4]:

$$n_{р(ш,к)} = \psi^{t}_{ш,к}, \qquad (6)$$

где $\psi_{ш,к}$ — коэффициент относительного удлинения материалов шестерен;

t — показатель фрикционной усталости материалов шестерен для сталей $t = 1{,}3$ [4].

Значение $\psi_{ш,к}$ зависит от твердости материала шестерен. С увеличением твердости $\psi_{ш,к}$ уменьшается.

Для определения расчетной длины зуба коэффициенты относительного удлинения материала шестерен в зависимости от твердости условно приняты: $Н_{ш,к} = 2000$, $n_{р(ш,к)} = 12{,}55$; $Н_{ш,к} = 3000$, $n_{р(ш,к)} = 10{,}27$; $Н_{ш,к} = 4000$, $n_{р(ш,к)} = 8{,}10$; $Н_{ш,к} = 5000$, $n_{р(ш,к)} = 6{,}96$; $Н_{ш,к} = 6000$, $n_{р(ш,к)} = 5{,}10$ и $Н_{ш,к} = 7000$, $n_{р(ш,к)} = 4{,}17$.

Для зубчатых колес, работающих в абразивной среде и при наличии проскальзывания между зубьями шестерен, в целях снижения расчетной длины зубьев материал зубчатого колеса должен иметь более высокую твердость.

В табл. 3 приведены изменения расчетной длины зубьев шестерен, работающих в масле, в котором отсутствуют абразивные частицы при наличии проскальзывания между зубьями шестерен в зависимости от изменения предела текучести материала шестерен с 800 до 1150 МПа. Известно, что повышение предела текучести приводит к росту коэффициента относительного удлинения материалов шестерен, а также к повышению числа циклов нагружения, что в свою очередь является причиной разрушения передеформированной поверхности трения. Предположим, предел текучести поверхности трения изменился от 800 до 1150 МПа с интервалом 50 МПа, что привело к повышению коэффициента относительного удлинения материалов шестерен от 5 до 6,75 %, т.е. при 800 МПа — 5 %; 850 МПа — 5,25 %; 900 МПа — 5,5 %; 950 МПа — 5,75 %; 1000 МПа — 6 %; 1050 МПа — 6,25 %; 1100 МПа — 6,5 %; 1150 МПа — 6,75 %. При этом в соответствии с коэффициентом относительного удлинения, количество циклов нагружения, приводящее к разрушению деформированного объема металла, $n_{р(ш,к)}$ имеет следующие значения: 8,10; 8,63; 9,17; 9,71; 10,27; 10,83; 11,39; 11,97. В зависимости от наибольшего и наименьшего пределов текучести и числа циклов нагружений, приводящих к разрушению передеформированной поверхности трения, требуется снижение

sb318.indd 129 06.03.2018 8:59:10

допустимой и расчетной длины зубьев в среднем в 2,1 раза при скорости изнашивания зубьев по толщине $3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч.

На основе результатов расчета и в целях создания эффективных компактных зубчатых передач агрегатов машин, работающих в масле без абразивных частиц по длине зубьев, необходимо выбрать материал для зубчатого колеса с повышенным пределом текучести.

Значения допустимой длины в среднем превышают расчетные на 9 % (см. табл. 3). Изменения допустимой и расчетной длин зубьев шестерен в зависимости от контактного напряжения определяли на основе исходных данных: $\theta_{ш,к} = 4{,}23 \cdot 10^{-6}$ 1/МПа; $C = 3$; $E_{пр} = 215\,000$ МПа; $\sigma_т = 1000$ МПа; $\psi = 0{,}772$; $n_{р(ш,к)} = 10{,}27$, когда в масле агрегата отсутствуют абразивные частицы, при наличии проскальзывания между зубьями шестерен. При повышении контактного напряжения с 7000 до 13 000 МПа допустимая и расчетная длины зубьев повышаются в среднем в 11,9 раза, т.е. допустимая длина зубьев на 8,8...9,3 % больше, чем у расчетной длины зубьев шестерен.

Таким образом, для того чтобы зубчатая передача была компактной по длине зубьев необходимо уменьшить контактную нагрузку в зацеплении, применив материал с более высоким пределом текучести и коэффициентом относительного удлинения.

Заключение

Предложена методика расчета длины зубьев шестерен в зависимости от износа зубьев шестерен и комплекса параметров зубчатого зацепления.

При всех рассмотренных модулях зацепления с его повышением независимо от наличия или отсутствия в масле агрегата абразивных частиц, допустимая и расчетная длины зубьев шестерен увеличиваются. Когда скорость изнашивания зубьев шестерен по толщине составляет $3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч, то допустимая длина зубьев шестерен при наличии в масле агрегата абразивных частиц на 5,8 % больше, чем расчетная, если в масле агрегата отсутствуют абразивные частицы, расчетная длина зубьев повышается на 8,7 % по сравнению с допустимой. Расчетная длина зубьев шестерен при наличии в масле абразивных частиц на 4,5 % больше, чем при их отсутствии.

Повышение передаточного отношения приводит к уменьшению допустимой и расчетной длин зубьев шестерен. Когда скорость изнашивания зубьев шестерен по толщине составляет $3{,}272 \cdot 10^{-8}$ м/ч, зубчатая передача в агрегате работает в условиях наличия в масле абразивных частиц, при одинаковых исходных данных допустимая длина зубьев шестерен на 3,9 % больше расчетной. Если зубчатая передача работает в чистом масле, без абразивных частиц, то допустимая длина зубьев больше расчетной на 8,7 %. Расчетная длина зубьев шестерен, работающих при наличии в масле агрегата абразивных частиц, на 4,6 % больше по сравнению с работой в масле без абразивных частиц.

Для зубчатых передач агрегатов машин, работающих в масле, содержащем абразивные частицы с повышенной твердостью от 2000 до 7000 МПа, допустимая длина зубьев уменьшается в 4,1, а расчетная — в 3,66 раза, что связано с повышением числа циклов, приводящих к разрушению дформированного слоя материала шестерен, и снижением соотношения твердости материала шестерни и прочности абразивных частиц в зависимости от роста твердости материала шестерен.

Длина зубьев шестерен, работающих в масле без абразивных частиц, увеличивается с повышением предела текучести материала шестерен допустимая и расчетная длины зубьев уменьшаются в 2,1 раза (с повышением предела текучести с 800 до 1150 МПа). С повышением контактного напряжения в зубчатой передаче допустимая и расчетная длины зубьев увеличиваются в 11,9 раза (с повышением контактного напряжения с 7000 до 13 000 МПа). Допустимая длина зуба в заданном значении предела текучести материала на 9 % и контактном напряжении на 8,8 % больше, чем при расчетной длине зуба.

Библиографический список

1. **Иванов М.Н.** Детали машин. М.: Высшая школа, 1976. 399 с.
2. **Разработка** методики теоретической оценки параметров и продолжительности износного испытания материалов зубчатых передач: отчет о НИР (промежуточный). Ташкент: ТашГТУ, 2014. 86 с.
3. **Разработка** методов повышения износостойкости зубчатых передач: Отчет о НИР. Ташкент: ТашГТУ. 2015. 94 с.
4. **Иргашев А.И.** Методологические основы повышения износостойкости шестерен тяжелонагруженных зубчатых передач агрегатов машин: дис... д-ра техн. наук. Ташкент: 2005, 244 с.
5. **Иргашев А.И., Абдазимов А.Д., Иргашев Б.А.** Факторы, влияющие на допустимую концентрацию активных абразивных частиц в масле агрегатов машин // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2016. № 1 (186). С. 30—38
6. **Контроль** технического состояния тракторных деталей при ремонте: справочник. М.: Колос, 1973. 624 с.
7. **Иргашев А.И.** Выбор модуля зацепления зубчатых передач по условиям прочности и износостойкости // Материалы Международной конференции "Ресурсо- и энергосберегающие, экологически безвредные композиционные материалы". Ташкент, 2013. С. 386—388.

sb318.indd 130 06.03.2018 8:59:11

УДК 678.073:661.481

С.В. Панин, *д-р техн. наук,* **Л.А. Корниенко,** *канд. физ.-мат. наук*
(Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск),
Хуан Цитао, В.О. Алексенко *(Томский политехнический университет),*
Л.Р. Иванова *(Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск)*
E-mail: rosmc@ospms.tsc.ru

Функционализация порошковых и волокнистых микронаполнителей для СВМПЭ обработкой в полиорганосилоксане*

Для получения высокопрочных и износостойких полимерных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) исследованы механические и триботехнические характеристики композиций СВМПЭ, наполненных микроволокнами волластонита и микрочастицами метагидроксида алюминия AlO(OH), предварительно обработанными в полиорганосилоксане в целях увеличения адгезии наполнителей к матрице. Выбор наполнителей и промоутера адгезии для сверхвысокомолекулярной матрицы обусловлен поиском эффективных промышленно выпускаемых наполнителей и модификаторов поверхности для создания износостойких полимерных композитов для узлов трения в машиностроении. Исследованы надмолекулярная структура, топография поверхности трения и износостойкость композиций на основе СВМПЭ при сухом трении скольжения при различных скоростях вращения контртела и нагрузках.

With the aim of development high strength, wear-resistant polymeric composites some mechanical and tribotechnical characteristics of the ultra-high molecular weight polyethylene (UHMW-PE)-composites filled with wollastonite microfibers and aluminum metahydroxide AlO (OH) microparticles preliminary treated in the polyorganosiloxane in order to increase their adhesion to the matrix have been studied. The choice of the fillers and adhesion promoters for the ultra-high molecular weight matrix is motivated by the search of efficient commercially available fillers and surface modifiers for design wear resistant polymeric composites for friction units in mechanical engineering. Permolecular structure, wear track surface topography and wear regularities of UHMW-PE based composites under dry sliding friction at different rates of counterface rotation and loads were investigated.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, микронаполнители, компатибилизатор, прочность, износостойкость, надмолекулярная структура.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, microfiller, compatibilizer, strength, wear resistance, permolecular structure.

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) обладает повышенными значениями ряда физико-механических и функциональных свойств, в частности высоким сопротивлением изнашиванию, низким коэффициентом трения, химической стойкостью и др. СВМПЭ широко применяют в машиностроении и медицине. Однако ненаполненный СВМПЭ испытывает значительный износ при длительной эксплуатации и обладает низкими показателями модуля упругости, предела текучести и предела прочности. Поиск путей повышения механических свойств и износостойкости композитов на основе СВМПЭ, работающих в экстремальных условиях эксплуатации, — актуальная научно-техническая задача.

Существуют различные подходы к формированию композитов на основе СВМПЭ с повышенными относительно ненаполненного полимера механическими характеристиками [1—3]. Однако ввиду химической инертности СВМПЭ при наполнении его различными добавками

* Работа выполнена в рамках плана фундаментальных научных исследований государственных академий наук 2013—2020 гг., а также проекта РФФИ 16-48-700192_р_а "Научные основы создания многоуровневых твердосмазочных, экстудируемых, антифрикционных композитов на базе перспективных термопластичных полимеров для медицины и машиностроения" с использованием оборудования ЦКП ИФПМ СО РАН и НАЦ НИ ТПУ.

sb318.indd 131 06.03.2018 8:59:11

(в том числе, минеральными наполнителями) химических связей на межфазных границах не образуется, что проявляется в крайне низкой адгезии наполнителей к СВМПЭ, и как следствие, снижении механических характеристик, прежде всего модуля упругости и удлинения до разрушения (особенно при высоких степенях наполнения).

Анализ результатов механических испытаний СВМПЭ, наполненного аэросилом (аморфный пирогенный диоксид кремния с размером частиц от 5 до 40 нм), после органофилизации выявил, что наряду с повышением модуля упругости наблюдается восьмикратное снижение трещиностойкости [3]. С другой стороны, показано, что функционализация аэросила позволяет как повысить механические свойства, так и увеличить сопротивление изнашиванию до двух раз при сухом трении скольжения за счет повышения межфазной связи. Подобные результаты получены и при введении в СВМПЭ микрочастиц каолинита, аппретированного атактическим полипропиленом, либо цетилтриметиламмоний бромида в качестве поверхностно-активного вещества [4].

В этом контексте очевиден интерес к применению микроразмерных наполнителей для СВМПЭ, которые могут быть функционализированы с применением компатибилизаторов (промоутеров адгезии) в целях повышения механических и триботехнических характеристик композитов. Поставлена задача повысить адгезию микронаполнителей (микроволокон и микрочастиц) к высокомолекулярной матрице СВМПЭ модификацией поверхности наполнителей полиорганосилоксаном.

Методики исследований

Использовали порошок СВМПЭ GUR-2122 фирмы Ticona молекулярной массой 4,0 млн г/моль (дисперсность частиц 5...10 мкм), микроволокна волластонита (диаметр 10 мкм, аспектное соотношение 5:1) ЗАО "ГЕОКОМ" (Калужская обл.) и микропорошок метагидроксида алюминия AlO(OH) (2...5 мкм) (модифицирующая добавка "TS-104" фирмы ООО "Техно-Сервис" (С.-Петербург). Для модифицирования поверхности наполнителей применяли жидкий реагент "Пента-1006" ООО "ПЕНТА-91 (Москва), представляющий собой композит на основе поли[окси(диметилсилилена)] $[R_2SiO]_n$, где R — кислородосодержащие высокомолекулярные кремний-органические соединения [5].

Функционализацию наполнителей осуществляли их обработкой в водно-этанольных (pH = = 4,5...5,5) растворах модификатора "Пента-1006" при комнатной температуре при непрерывном перемешивании в течение 5 мин. Содержание реагента "Пента-1006" составляло 1 % от массы наполнителя (0,2 % от общей массы смеси). Затем суспензию высушивали в тепловом шкафу при температуре 120 °С.

Объемные образцы композитов получали горячим прессованием на прессе МС-500 в пресс-форме, обогреваемой кольцевой разъемной печью с цифровым управлением, при давлении 10 МПа и температуре 200 °С со скоростью последующего охлаждения 3...4 °С/мин. Порошки полимерной матрицы СВМПЭ и наполнителей перемешивали в планетарной шаровой мельнице МП4/0,5 с предварительным диспергированием в ультразвуковой ванне взвеси компонентов в этиловом спирте.

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

ИК-спектры получали на спектрометре NIKOLET 5700 (Thermo Electron Corporation, USA). Структурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 (Carl Zeiss, Germany) при ускоряющем напряжении 20 кВ по поверхностям скола, полученным механическим разрушением образцов с надрезом, предварительно выдержанных в жидком азоте.

Результаты исследований

При изучении физико-механических свойств образцов полимерных композитов на основе СВМПЭ с массовой долей волластонита 20 % и метагидроксида алюминия 20 % выявлено, что плотность и твердость СВМПЭ возрастают при наполнении его микроволокнами и микрочастицами. Протекание процедуры гидролиза не сказывается на изменении данных параметров.

Модуль упругости E и предел текучести $\sigma_{0,2}$ существенно возрастают при наполнении матрицы функционализированными порошковыми и волокнистыми микронаполнителями, что косвенно свидетельствует в пользу повышения межфазной адгезии на границе между наполнителем и матрицей. Обработка наполните-

sb318.indd 132 06.03.2018 8:59:11

Физико-механические свойства СВМПЭ и композитов на его основе

Состав с массовой долей наполнителя, %	Плотность ρ, г/см^3	Твердость по Шору *D*	Модуль *E*, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Удлинение ε, %
СВМПЭ без наполнителя	0,928	55,6 ± 0,2	405 ± 17	22,1 ± 0,4	36,0 ± 1,6	482 ± 6
СВМПЭ + 20 % волластонит	1,062	58,9 ± 0,7	501 ± 30	24,7 ± 1,1	36,8 ± 5,7	454 ± 60
СВМПЭ + 20 % волластонит + 0,2 % "Пента-1006" (гидролиз)	1,062	59,19 ± 0,6	620 ± 46	25,2 ± 1,3	34,0 ± 4	415 ± 23
СВМПЭ + 20 % волластонит + 0,2 % "Пента-1006"	1,062	59,1 ± 0,5	484 ± 26	22,4 ± 0,8	34,5 ± 1,2	424 ± 55
СВМПЭ + 20 % AlO(OH)	1,07	60,23 ± 0,6	509 ± 55	21,9 ± 1,3	33,2 ± 1,9	425 ± 39
СВМПЭ + 20 % AlO(OH) + 0,2 % "Пента-1006" (гидролиз)	1,064	59,4 ± 0,5	564 ± 19	23,1 ± 0,5	37,0 ± 1,5	446 ± 26

лей с более высокой массовой долей полиорганосилоксана в растворе (например, 1 %) приводит к уменьшению механических характеристик (модуля упругости, предела текучести), поэтому в работе принято за рациональное содержание полиорганосилоксана в композициях 0,2 %.

В работах [6, 7] описан механизм гидролиза в полиорганосилоксане, в результате которого с участием кислотного катализатора при температуре 120 °С на поверхности наполнителя протекает реакция полимеризации Si—O—Si. Это позволяет получить аппретированные порошковые и волокнистые наполнители. На рис. 1 приведены ИК-спектры СВМПЭ-композитов с исходными и аппретированными волокнами волластонита, которые подтверждают появление на поверхности наполнителя Si—O связей (1531 и 1608 см$^{-1}$).

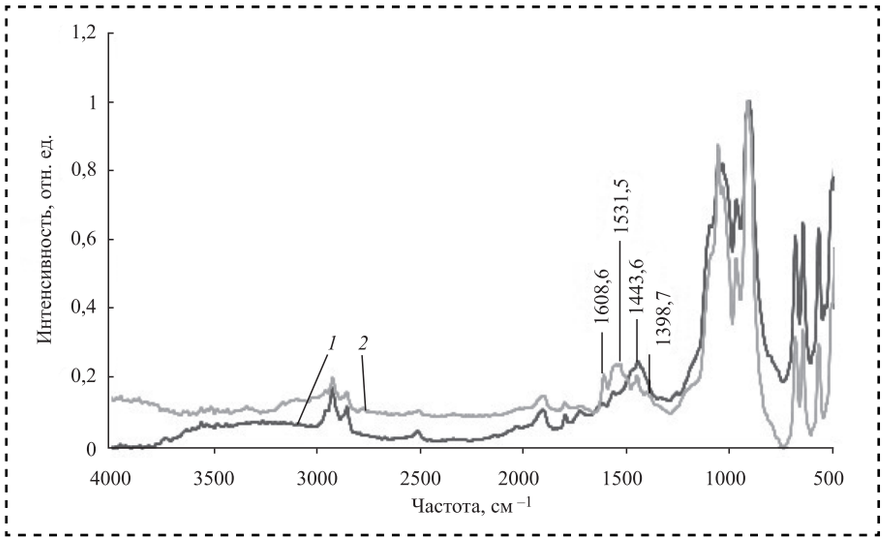


Рис. 1. ИК-спектры образцов СВМПЭ с массовой долей 0,2 % волластонита, модифицированного полиорганосилоксаном:
1 — без инициации гидролиза; *2* — после гидролиза

У композиционных материалов, армированных аппретированным волластонитом, увеличивается модуль Юнга на 23 % в сравнении с исходным (необработанным) волластонитом (таблица). В случае наполнения СВМПЭ функционализированным метагидроксидом алюминия механические свойства повышаются в среднем на 10 %. Удлинение при растяжении наполненных композитов уменьшается незначительно по сравнению с исходным СВМПЭ, так как в условиях невысокой адгезии введение микрочастиц редко повышает механические характеристики полимерных композитов [8].

Исследования надмолекулярной структуры порошковых и волокнистых композитов на основе СВМПЭ показали, что при массовой доле наполнителя 20 % формирование сферолитной надмолекулярной структуры подавляется (рис. 2). При этом микроволокна и микрочастицы достаточно равномерно распределены в полимерной матрице. В силу высокой степени наполнения кристалличность композиций не превышает 15 % [9, 10].

Исследованы износостойкость композитов на основе СВМПЭ с исходными и аппретированными наполнителями при сухом трении скольжения в условиях различных скоростей и нагрузок. При испытании в режиме сухого трения скольжения скорость вращения контртела составляла 0,3 и 0,5 м/с; нагрузка на образец — равнялась 60 и 140 Н.

На рис. 3 приведены данные оценки объемного износа композитов, наполненных исходным и функционализированным полиорганосилоксаном

sb318.indd 133 06.03.2018 8:59:11

волластонитом (механическая смесь и механическая смесь, подвергнутая гидролизу). При умеренной скорости скольжения и нагрузке на образец $N = 60$ Н износ снижается более чем в 2 раза (рис. 3, *а*). При этом гидрогенезированный волластонит эффективно сопротивляется изнашиванию и при большой скорости скольжения 0,5 м/с (рис. 3, *б*).

При большой нагрузке интенсивность изнашивания образцов кратно возрастает (до 5—10 раз) при обеих скоростях скольжения как в СВМПЭ, так и в композитах с функционализированными наполнителями (рис. 3, *а* и *б*). Аппретированный полиорганосилоксаном (с протеканием процесса гидролиза) волластонит показывает наиболее высокую износостойкость среди композитов при больших нагрузках, что указывает на эффективность этого способа аппретирования наполнителя в сравнении с простым механическим смешением компонент композиции.

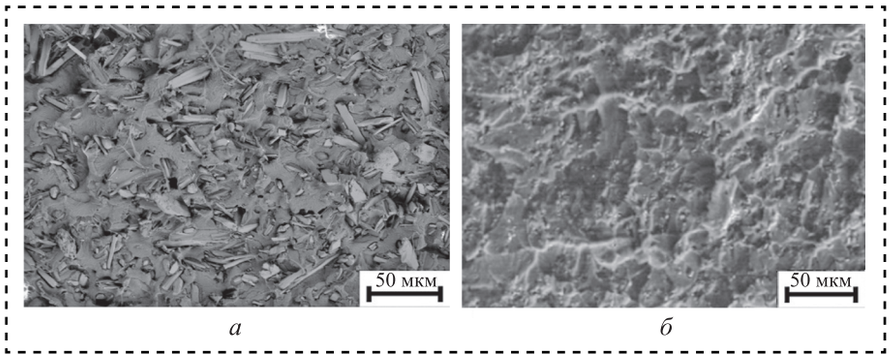


Рис. 2. РЭМ-микрофотографии надмолекулярной структуры композитов СВМПЭ + 20 % волластонита (*а*), СВМПЭ + 20 % AlO(OH) (*б*)

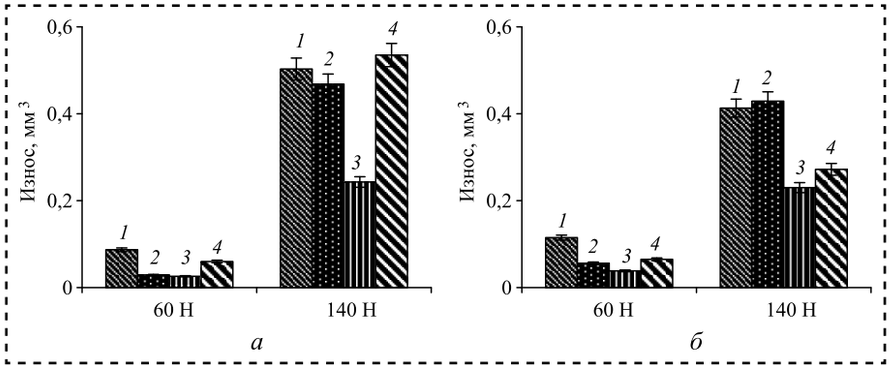


Рис. 3. Объемный износ при скоростях 0,3 (*а*) и 0,5 м/с (*б*) и нагрузках 60 и 140 Н для образцов:
1 — СВМПЭ; *2* — СВМПЭ + 20 % волластонита; *3* — СВМПЭ + 20 % волластонита + 0,2 % "Пента-1006" (с гидролизом); *4* — СВМПЭ + 20 % волластонита + 0,2 % "Пента-1006" (без гидролиза)

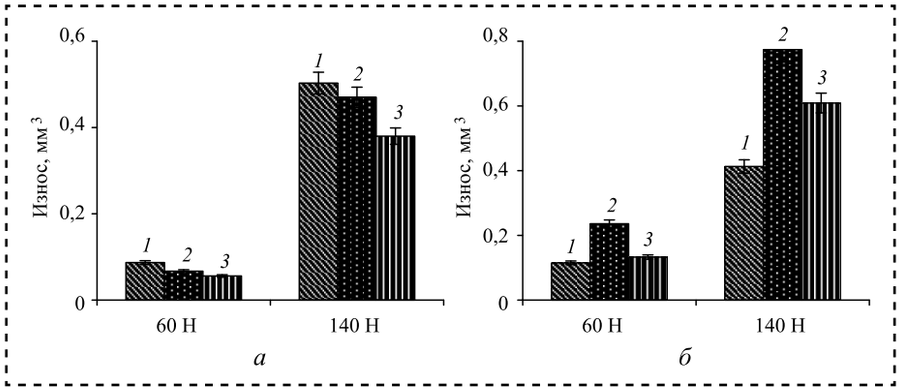


Рис. 4. Объемный износ при скоростях 0,3 (*а*) и 0,5 м/с (*б*) и нагрузках 60 и 140 Н для образцов:
1 — СВМПЭ; *2* — СВМПЭ + 20 % AlO(OH); *3* — СВМПЭ + 20 % AlO(OH) + 0,2 % "Пента-1006" (гидролиз)

На примере микроволокон волластонита доказана эффективность проведения процедуры гидролиза, поэтому при наполнении микрочастицами метагидроксида алюминия аппретирование наполнителя без гидролиза не проводили. На рис. 4 приведены данные измерения объемного износа композитов на основе СВМПЭ, наполненных аппретированным метагидроксидом алюминия при сухом трении скольжения. При нагрузке 60 Н в случае наполнения СВМПЭ функционализированными микрочастицами (и инициацией гидролиза) износ уменьшился как при умеренной, так и при большой скорости скольжения (0,3 и 0,5 м/с) (рис. 4, *а, б*). С повышением нагрузки до 140 Н износ СВМПЭ и композитов также кратно возрастает при обеих скоростях скольжения. При этом износ наполненных композитов может превышать таковую для чистого СВМПЭ.

Рис. 5 иллюстрирует изменение топографии поверхностей износа СВМПЭ и композитов с функционализированными частицами метагидроксида алюминия и волокнами вол-

sb318.indd 134 06.03.2018 8:59:11

ластонита в различных условиях испытания образцов (скорость, нагрузка). Характер изменения топографии поверхностей износа полностью коррелирует с величиной объемного износа композитов в условиях различных скоростей скольжения и нагрузок (см. рис. 4).

Введение функционализированных порошковых и волокнистых наполнителей позволило через повышение межфазной адгезии в композитах увеличить механические и триботехнические характеристики. В работе [6] предложен механизм повышения межфазной адгезии в композитах с аппретированными наполнителями за счет взаимной диффузии, проникновения и переплетения молекулярных цепей матрицы и органической части полиорганосилоксана, полимеризующегося на поверхности наполнителя в процессе гидролиза.

В подтверждение диффузионного механизма повышения адгезии аппретированных наполнителей к высокомолекулярной матрице СВМПЭ (и, соответственно, их способности к упругому восстановлению) свидетельствуют данные, приведенные на рис. 6. Представлены результаты оценки объема дорожки трения (изначально используемого для оценки объемного износа) композитов СВМПЭ с аппретированными наполнителями волластонита (рис. 6, *а*) и AlO(OH) (рис. 6, *б*) сразу после окончания трибонагружения и после повторного измерения через пять дней

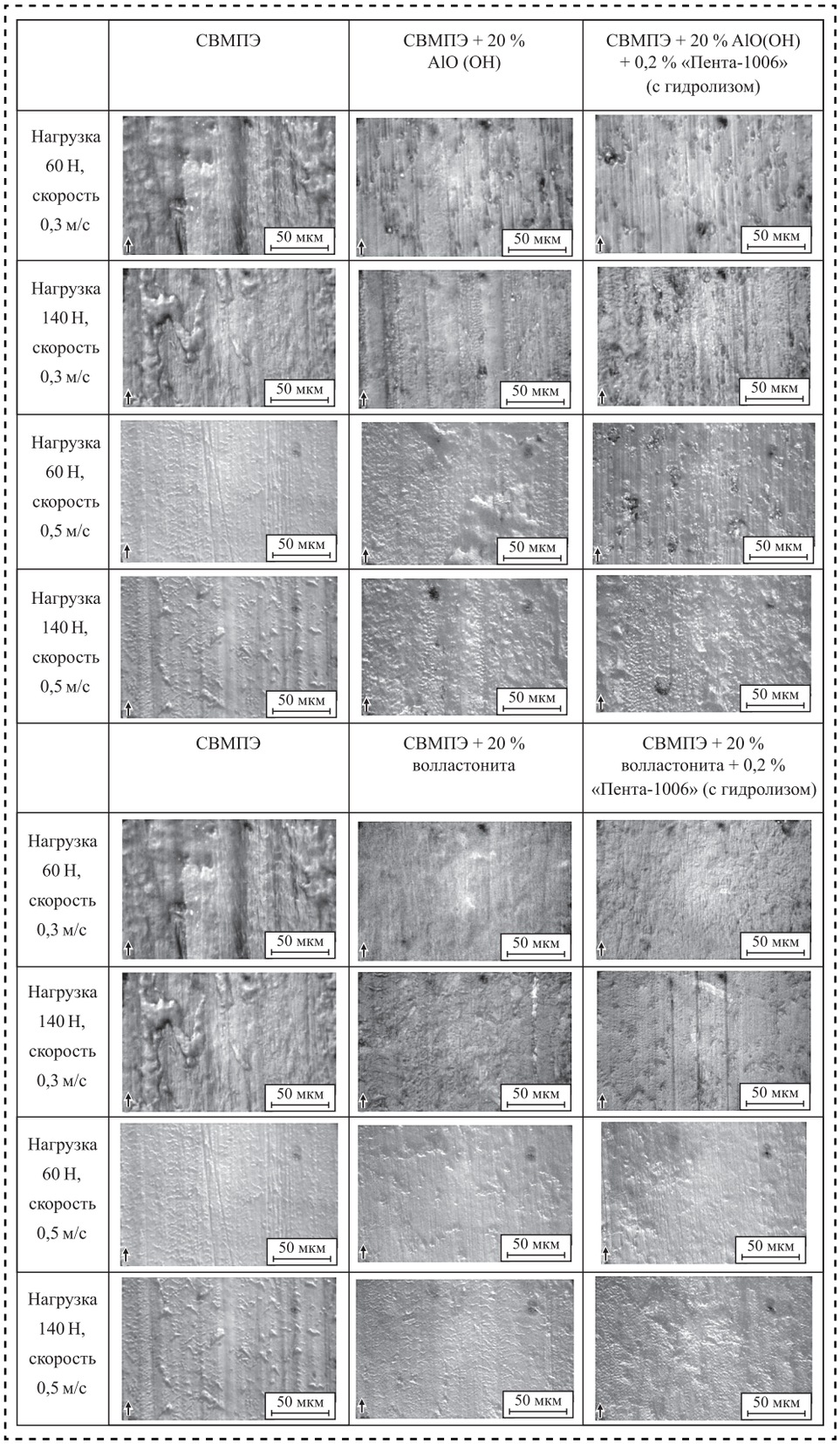


Рис. 5. Оптические микрофотографии топографии поверхностей износа СВМПЭ и композитов на его основе при различных скоростях скольжения и нагрузках. Стрелкой показано направление скольжения контртела

sb318.indd 135 06.03.2018 8:59:12

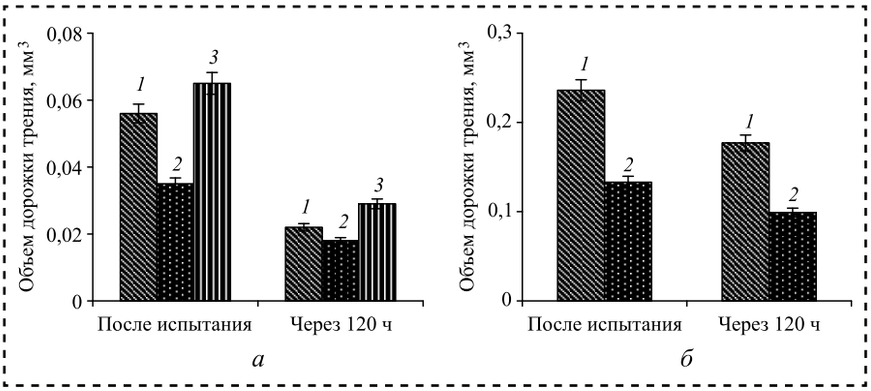


Рис. 6. Объем дорожки трения композитов СВМПЭ при скорости 0,5 м/с и нагрузке 60 Н:
а — с волластонитом: *1* — СВМПЭ + 20 % волластонита; *2* — СВМПЭ + 20 % волластонита + 0,2 % "Пента-1006" (с гидролизом); *3* — СВМПЭ + 20 % волластонита + 0,2 % "Пента-1006" (без гидролиза);
б — с AlO(OH): *1* — СВМПЭ + 20 % AlO(OH); *2* — СВМПЭ + 20 % AlO(OH) + 0,2 % полиорганосилоксана

после испытаний. Анализируемый параметр при повторном измерении (через несколько дней) уменьшился примерно на 30 % практически независимо от факта аппретирования микрочастиц наполнителя (с инициацией процесса гидролиза). С другой стороны, при аппретировании микроволокон волластонита формирование межфазной адгезии способствовало заметному упругому восстановлению дорожки трения через 120 ч после окончания трибоиспытаний (рис. 6, *а*). Это хорошо согласуется с данными механических испытаний на растяжение.

Полученные результаты свидетельствуют в пользу диффузионной концепции адгезии аппретированных наполнителей к матрице и, как следствие, упорядочения (возможного повышения кристалличности) надмолекулярной структуры в поверхностных слоях образцов после испытаний на сухое трение. Данное предположение соответствует концепции внешнего поверхностного слоя в наполненных полимерных композитах [11], однако требует проведения более точных микроскопических (микроструктурных) исследований.

Заключение

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

Показано, что обработка волокнистых и порошковых наполнителей полиорганосилоксаном с инициированием процесса гидролиза повышает механические характеристики композитов на основе высокомолекулярной матрицы на 10 %, а износостойкость микрокомпозитов повышается в два раза при скоростях 0,3 и 0,5 м/с при умеренной нагрузке (60 Н) по сравнению с чистым СВМПЭ. При увеличении нагрузки до 140 Н износостойкость композитов резко снижается. По этой причине микрокомпозиты на основе СВМПЭ с функционализированными волокнистыми и порошковыми наполнителями могут быть рекомендованы для работы в узлах трения в широком интервале скоростей (до 0,5 м/с) и умеренных нагрузках до 60 Н.

Способ аппретирования минеральных наполнителей (волокнистых и порошковых) высокомолекулярной матрицы полиорганосилоксаном можно использовать для повышения износостойкости высоконаполненных композитов на основе СВМПЭ.

Библиографический список

1. **Компьютерное** моделирование и конструирование наполненных композиций. Монография / Б.А. Люкшин и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. 263 с.

2. **Steven M. Kurtz.** The UHMWPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement // Academic press. 2004, 379 p.

3. **Андериха В.Н., Шаповалов В.А., Краснов А.П., Плескачевский Ю.М.** О влиянии органофилизации аэросила на трибологические свойства малонаполненных композитов СВМПЭ // Трение и износ. 2008. (29), № 4. С. 421—427.

4. **Никифоров Л.А., Гоголева О.В., Охлопкова А.А., Борисова Р.В.** Наполнение сверхвысокомолекулярного полиэтилена модифицированным каолинитом // Вопросы материаловедения. 2013. № 3 (75). С. 48—54.

5. **Электронный ресурс.** URL: http://itwpenta.ru/area/proizvodstvo_himicheskoj_produkcii1/pererabotka_termoplastov_poliolefinov_i_pvh/modifikator_penta-1006.

6. **Plueddemann E.P.** Silane Coupling Agents. New York and London: Plenum Press, 1991.

7. **Jang Kyo Kim, Man Lung Sham, Jinshen Wu.** Nanoscale characterization of interphase in silane treated glass fibre composites // Composites, part A, 2001, 32. P. 607—618.

8. **Полимерные** композиционные материалы. Свойства. Структура. Технологии / под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2009. 560 с.

9. **Comparison** of mechanical and tribotechnical properties of UHMWPE reinforced with basalt fibers and particles / Panin S.V. et al // Materials Science and Engineering, 2016. Vol. 156. No. 1. P. 170—176.

10. **Износостойкость** твердосмазочных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), наполненного нитридом бора / С.В. Панин и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 8. С. 26—33.

11. **Структурные** уровни разрушения эпоксидных композитных материалов при ударном нагружении / П.Д. Стухляк и др. Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 2. С. 65—83.

sb318.indd 136 06.03.2018 8:59:14

УДК 621.891:678.5

А.А. Петренко *(Политехнический институт (филиал) Донского государственного технического университета, г. Таганрог)*
E - mail: petrenko.dstu@mail.ru

Параметры катастрофического изнашивания

Приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования параметров катастрофического изнашивания антифрикционных композиционных полимерных покрытий.

The paper presents the results of the experimental study and model for the parameters for the catastrophic wear of the antifriction polymeric cover.

Ключевые слова: антифрикционные полимерные покрытия, катастрофический износ, эксперименты, модель.

Keywords: antifriction polymeric cover, catastrophic wear, experiments, model.

Введение

Завершающий период процесса работы трибосистемы — нестационарный процесс катастрофического изнашивания с прогрессирующим необратимым накоплением деструктивных явлений. При нормальной эксплуатации трибосистема должна быть исправлена или заменена новой до наступления этого периода. Для оценки времени до наступления отказа необходимо знать продолжительность предаварийного периода катастрофического изнашивания.

Период катастрофического изнашивания наступает у полимерных композиционных покрытий при полном износе рабочего фторопластового слоя и обнажения прочных полиимидных нитей в фенольной матрице, которые непосредственно контактируют с металлическим контртелом [1].

Полиимидные волокна аримид Т имеют весьма низкие антифрикционные свойства. Остаточное смазочное действие оказывает перенесенная на контртело пленка фторопласта, но ее эффект случаен и нестабилен. Отсутствие фторопластового смазывания и прямой контакт металла с жесткоцепными полиимидными волокнами в нитях аримида Т изменяет характер трения и тип изнашивания. Вместо граничного трения при смазывании фторопластом реализуется трение без смазочного материала и осуществляется преимущественно усталостный тип изнашивания полиимидных нитей в фенольной матрице.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Период катастрофического изнашивания моделировали композиционным покрытием на основе специальной тонкой (0,27 мм) ткани (сатин 3/8), изготовленной только из полиимидных нитей аримид Т без фторопласта. Композит наносили в виде покрытия на фенольном матричном связующем, модифицированном термостойким каучуком. Исследования проводили на специальном стенде, сформированном на базе токарно-винторезного станка при нагрузочно-скоростных режимах: σ = 13 МПа, v = 0,214 м/с. Число параллельных опытов — три.

Последующая обработка экспериментальных результатов позволила получить адекватную модель процесса и его триботехнические параметры с доверительными интервалами 95 %.

Особенность композиционной структуры описанного модельного покрытия — прочное сцепление матрицы со смачиваемыми нитями аримида, что полностью соответствует структуре и свойствам нижнего (изнаночного) слоя моделируемых покрытий.

Нити из аримида Т не совместимы со стальным контртелом, что проявляется в ином характере прирабатываемости этой пары трения по сравнению с фторопластсодержащим покрытием (рис. 1).

sb318.indd 137 06.03.2018 8:59:14

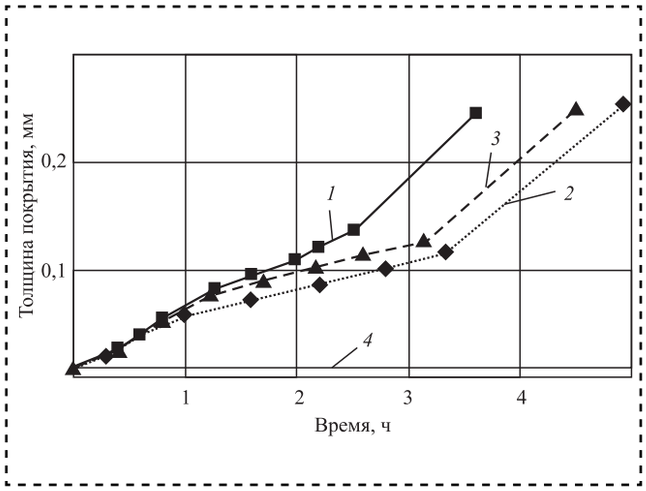


Рис. 1. Изменение зазора подшипника с полимерным композиционным покрытием на основе ткани сатин 3/8 при триботехнических испытаниях:
1 — образец 1; *2* — образец 2; *3* — образец 3; *4* — δ_0

Упругую деформацию δ_0 под действием контактных напряжений определяли исходя из выражения для упругого модуля покрытия, МПа [2]:

$$E_0 = 5,59 \cdot 0,998^{-T^2} \sigma^{1,14-0,02T^2}, \qquad (1)$$

где T — температура;

σ — контактные напряжения.

Так как период классической приработки по Лоренцу очень короткий, при построении модели предположили, что линейный стационарный период изнашивания быстро переходит в катастрофический.

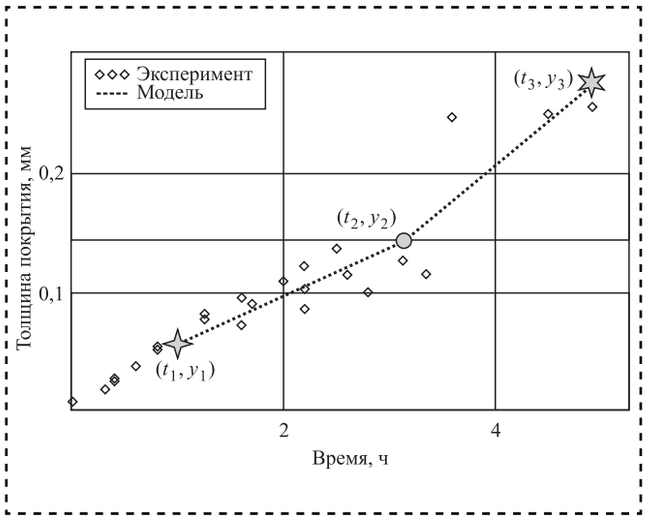


Рис. 2. Экспериментальный график катастрофического изнашивания и его модели

При этих упрощающих положениях зависимость процесса изнашивания h от времени t характеризуется на диаграмме износа тремя точками (рис. 2). Координаты этих точек полностью определяют характер изнашивания (t_1, y_1), (t_2, y_2), (t_3, y_3): от момента t_1 до момента t_2 — стационарный период и от t_2 до t_3 — катастрофический.

Искомая аналитическая зависимость:

$$h(t, t_1, y_1, t_2, y_2, t_3, y_3) = \\ = \begin{cases} \dfrac{(y_2 - y_1)(t - t_1)}{(t_2 - t_1)} & \text{при} \quad t \leqslant t_2; \\ \dfrac{(y_3 - y_2)(t - t_2)}{(t_3 - t_2)} & \text{при} \quad t_2 < t \leqslant t_3. \end{cases} \qquad (2)$$

Для построения по эмпирическим данным модели зависимости износа от времени время начала стационарного изнашивания t_1 и время достижения предельного ресурса t_3, соответствовали экспериментальным результатам.

Остальные параметры t_2, y_1, y_2, y_3 определяли на основе минимизации функционала невязок:

$$\min_{y_1, t_2, y_2, y_3} \Delta(y_1, t_2, y_2, y_3) = \\ = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left[h_i^{\exp} - h\left(t_i^{\exp}, t_1, y_1, t_2, y_2, t_3, y_3\right) \right]^2 \right\}^{1/2}.$$

Процедуру минимизации выполняли с помощью алгоритма Левенберга—Марквардта, встроенного в систему MathCAD.

Скорость изнашивания на стационарном и катастрофическом участках кривой Лоренца вычисляли по значениям (t_1, y_1); (t_2, y_2); (t_3, y_3):

$$a_{\text{ст}} = (y_2 - y_1)/(t_2 - t_1); \\ a_{\text{кат}} = (y_3 - y_2)/(t_3 - t_2). \qquad (3)$$

Результаты моделирования представлены в таблице.

Результаты моделирования изнашивания

Параметр	Период изнашивания	
	Стационарный	Катастрофический
Время t, ч	3,15 ± 0,35	1,85 ±0,15
Износ h, мм	0,145 ± 0,015	0,125 ± 0,01
Скорость изнашивания v, мкм/ч	46,0 ± 10	67,6 ± 11

sb318.indd 138 06.03.2018 8:59:14

Поскольку при наступлении катастрофического периода трения необходимо знать величину изнашивания без учета уже происшедшей упругой деформации, ее величина не учитывается.

Вывод

Анализ результатов моделирования периода катастрофического изнашивания в виде графиков и табличных данных позволил с вероятностью 95 % установить для средних нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации антифрикционных полимерных композиционных покрытий предаварийное время, которое позволяет оценить их остаточный ресурс.

Библиографический список

1. **Кохановский В.А., Петров Ю.А.** Трение и изнашивание фторопластсодержащих композитов // Вестник ДГТУ. 2009. Т. 9. № 1 (40). С. 30—35.

2. **Кохановский В.А.** Модуль упругости покрытий на основе самосмазывающихся волокнитов // Известия СКНЦВШ. Сер. Технические науки. 1986. № 2. С. 80—83.

УДК 621.9

М.Ш. Мигранов, *д-р техн. наук,* **В.Р. Мухамадеев, С.М. Минигалеев,** *канд. техн. наук,*
И.Р. Мухамадеев *(Уфимский государственный авиационный технический университет)*
E-mail: migmars@mail.ru

Исследование морфологических изменений наноструктурного трехкомпонентного покрытия TiAlN

Экспериментально исследовано влияние температуры и пластической деформации на структурно-фазовые изменения, происходящие на границе "наноструктурное покрытие—подложка".

Experimental by studied the influence of temperature and plastic deformation on the structural-phase changes occurring on the border at the "nanostructured coating—substrate".

Ключевые слова: диффузия, дефекты, покрытие, режущий инструмент, легирование, структура, наноматериалы, кристаллическая решетка, поверхность, углерод, азот.

Keywords: diffusion, defects, coating, cutting tool, alloying, structure, nanomaterials, crystal lattice, surface, carbon, nitrogen.

Применение современного металлорежущего оборудования, оснащенного системами с ЧПУ и АдСУ, повышает требования, предъявляемые к качеству и износостойкости режущего инструмента, а также ужесточает условия его работы: высокие температуры и контактные напряжения активируют физико-химические и структурно-фазовые процессы. В таких условиях наблюдается интенсивное изнашивание контактных площадок от абразивного воздействия твердых включений в обрабатываемых материалах, значительное развитие адгезионно-усталостных, коррозионно-окислительных, диффузионных и структурно-фазовых изменений. Повышение износостойкости режущего инструмента возможно за счет изменения состояния приповерхностных свойств, при которых наиболее эффективно режущий инструмент сопротивляется изнашиванию, особенно при повышенных температурах. При этом инструментальный материал в объеме тела режущего инструмента должен одновременно обладать достаточным запасом прочности при сжатии и изгибе, приложении ударных импульсов и знакопеременных напряжений. Широкое производственное применение режущих инструментов с покрытиями позволяет:

sb318.indd 139 06.03.2018 8:59:14

повысить стойкость и надежность инструмента; сократить расход дорогостоящих инструментальных материалов; расширить область использования и существенно сократить номенклатуру применяемых твердосплавных режущих инструментов [1—4].

Экспериментальные исследования по проектированию инновационных многослойных мультиплексных покрытий выполняют универсальные задачи по повышению работоспособности и эксплуатационных свойств режущего инструмента различного назначения, варьируя составом, структурой, архитектурой и свойствами покрытий. Наибольшее распространение для решения указанных задач получили многослойные композиционные наноструктурированные покрытия. Одно из наиболее перспективных направлений — легирование покрытий различными элементами и соединениями (алюминий, иттрий [2] и т.д.) на основе учета явлений, возникающих в процессе эксплуатации.

Стационарному процессу изнашивания в наибольшей степени соответствует нормальный износ, нестационарному — приработка и интенсивный (или катастрофический) износ [1—3]. Для режущего инструмента, работающего главным образом в условиях адгезионного изнашивания, интенсивный износ аналогичен режиму заедания (микросварка). Приработке соответствует процесс перехода к устойчивому состоянию, а заедание проявляется как неустойчивый процесс, который характеризуется самоускоряющимся возрастанием интенсивности изнашивания.

Поэтому создание многослойных покрытий для режущего инструмента, очередной слой которых отвечал бы соответствующей текущей фазе изнашивания — рациональная и вполне реализуемая задача.

Нанесение покрытий методами вакуумно-дугового осаждения позволяет формировать покрытия с различными функциональными особенностями, соответствующими современным требованиям многокомпонентных, многослойных покрытий. В связи с этим знание морфологии и структурно-фазового состояния конденсированных покрытий — необходимое требование для понимания диффузионных и структурных изменений, проходящих не только в зоне контакта, но и на границе покрытие—подложка.

Основное отличие конденсированных наноструктурированных покрытий от соединений, образованных объемными частицами, — высокая дефектность и развитость поверхности, обладающая свойствами, отличными от свойств объема. Удельная доля поверхностных частиц в объеме наноматериала доходит до десятков процентов, следовательно, "размерный эффект" играет существенную роль. Уменьшение размеров зерен до 100 нм и менее приводит к увеличению параметров кристаллической решетки [5].

Покрытия, нанесенные на режущие инструменты, позволяют увеличить его износостойкость за счет уменьшения силы трения, снижения деформации и силы резания, изменение направления и интенсивности тепловых потоков, при этом повышение износостойкости инструмента с покрытиями также объясняется экранирующим эффектом контактных поверхностей от внешних воздействий [1, 3, 6].

Основное влияние на твердость покрытий, модуль упругости и другие физико-химические свойства оказывают: размер зерна; составляющие компонентов покрытия; температура подложки; способы нанесения и возможность образования аморфной фазы из нитридов [7, 8].

На основе соотношения Холла—Петча к определению твердости нанокристаллических материалов возможно предположить максимальное значение твердости, зависящей от размера зерна [9].

В нанокристаллическом материале объемная доля границ зерен значительно больше по сравнению с обычным микрокристаллическим материалом. В случае нанокристаллического состояния общая твердость определяется по формуле [10]:

$$H = H_з(1 - f) + H_{гз}f,$$

где f — объем границ зерен в материале.

В соответствии с соотношением Холла—Петча рассчитывается твердость зерен и границ зерен:

$$H_з = H_{0з} + k_з d^{-0,5};$$

$$H_{гз} = H_{0гз} + k_{гз} d^{-0,5},$$

где $H_{0з}$ и $H_{гз}$ — твердость тела зерна и границы зерна, соответственно;

d — размер зерна;

k — коэффициент Холла—Петча.

Цель исследования — определение возможных структурно-фазовых изменений между наноструктурным покрытием и микроструктурной подложкой, происходящих при пластической деформации и повышенных температурах в контактной зоне.

Для экспериментальных исследований использовали быстросменные многогранные пластины из твердосплавного титантанталкобальтового соединения ТТ8К6, предварительно подвергнутого азотированию (для лучшей адгезии

sb318.indd 140 06.03.2018 8:59:15

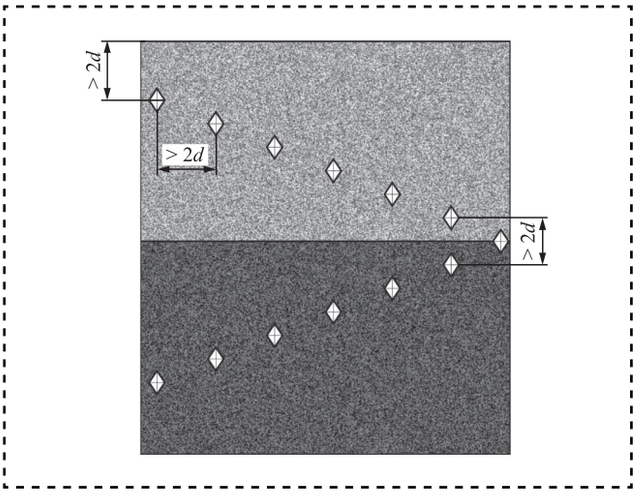


Рис. 1. Схема измерения микротвердости

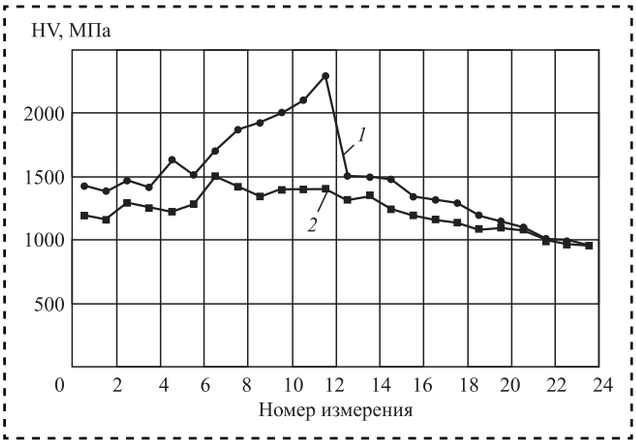


Рис. 2. Изменение микротвердости в зависимости от глубины измерения:
1 — исходный образец; *2* — образец после отжига под давлением (см. таблицу)

покрытия и подложки), с покрытием (Ti, Al)N. Толщина покрытия, измеренная на приборе Calotest, составила $h_{покр}$ = 6,124 мкм.

Зона контакта режущего инструмента с исследуемым материалом настолько мала, что требуется увеличение площади исследуемого образца. Для этой цели смоделировали процесс пластической деформации при повышенных температурах в зоне контакта.

Часть образцов подвергали отжигу при 700 °С под давлением 0,5 ГПа в течение 20 мин в условиях окружающей среды для определения возможного влияния атмосферы на режущий инструмент. На исходных образцах и образцах, подвергнутых отжигу под влиянием пластической деформации, подготовили косые шлифы под углом 5°. Глубина исследуемой области увеличивается в 9,57 раза, т.е. $h_{иссл} = 9{,}57h_{покр}$ = = 58,61 мкм. Эти образцы позволили исследовать гетерогенность состава на небольшой глубине под поверхностью, включая образовавшиеся пленки.

Травление проводили согласно ГОСТ 9391—80 раствором концентрированных плавиковой HF и азотной кислоты HNO_3 в соотношении 1:2 при температуре 18...20 °С продолжительностью 15...20 мин.

Микротвердость измеряли по ГОСТ 9450—76 на микротвердомере Struers Duramin при силе 5 Н и выдержке в течение 10 с (рис. 1).

Значения микротвердости получали на равном расстоянии от края покрытия на косом шлейфе: 12 значений в области покрытия и 12 на таких же расстояниях в подложке (таблица).

По полученным значениям микротвердости построены графики зависимости HV = $f(h_{иссл})$ (рис. 2).

Значения микротвердости образцов

Номер образца	Исходный образец	Образец после отжига под давлением	Глубина измерения, мкм	Номер образца	Исходный образец	Образец после отжига под давлением	Глубина измерения, мкм
1	1429	1195	0,52246604	13	1517	1325	6,792058516
2	1388	1168	1,044932079	14	1260	1360	7,314524556
3	1473	1300	1,567398119	15	1485	1250	7,836990596
4	1419	1259	2,089864159	16	1360	1200	8,359456635
5	1639	1230	2,612330199	17	1320	1170	8,881922675
6	1520	1290	3,134796238	18	1300	1150	9,404388715
7	2062	1512	3,657262278	19	1200	1095	9,926854754
8	1874	1420	4,179728318	20	1150	1105	10,44932079
9	1931	1350	4,702194357	21	1100	1090	10,97178683
10	1711	1400	5,224660397	22	1010	1005	11,49425287
11	2102	1125	5,747126437	23	990	980	12,01671891
12	2296	1408	6,269592476	24	960	970	12,53918495

sb318.indd 141 06.03.2018 8:59:15

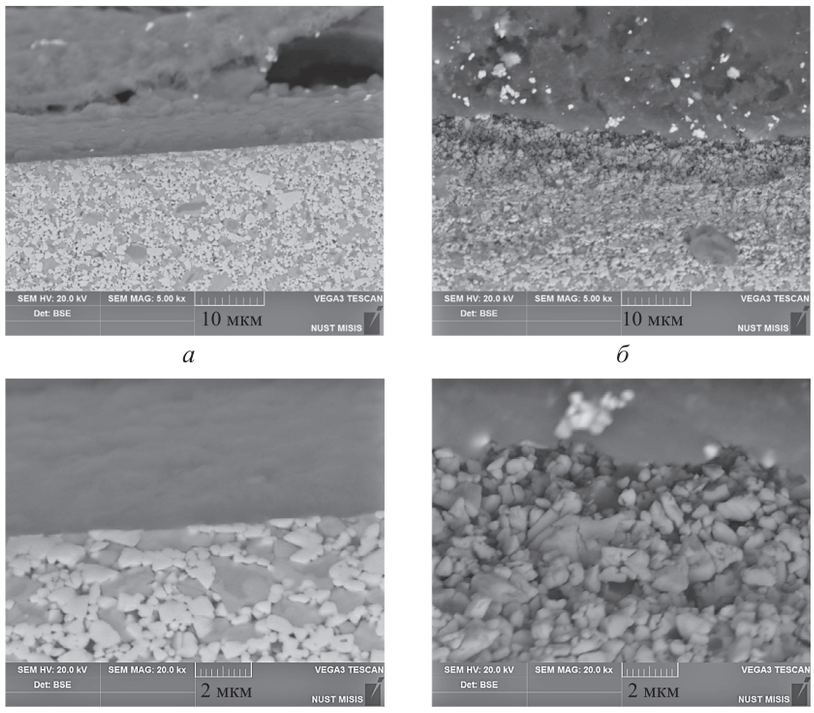


Рис. 3. Изображение шлифа (20 кВ, BSE) при увеличениях ×5000 (*а*, *б*) и ×20000 (*в*, *г*):
а, *в* — исходный образец; *б*, *г* — отожженный образец

Косые шлифы исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Vega3 фирмы Tescan при ускоряющем напряжении 20 кВ при увеличении ×5000 и ×20 000 детектором отраженных электронов (BSE — backscattered electrons), предназначенным для получения изображений с информацией о вариациях состава на основе контраста по атомному номеру (рис. 3).

Выводы

Увеличение микротвердости в исходном образце на границе "покрытие—подложка" предположительно связано с высоким содержанием азота, полученного азотированием поверхности перед нанесением покрытия. Подобное увеличение твердости может являться концентратором напряжений или других внутренних факторов, приводящих к отслоению покрытия (см. рис. 2).

Изменение микротвердости происходит за счет принудительного внедрения структурных элементов покрытия в кобальтовую связку подложки, что увеличивает среднее значение микротвердости в приповерхностных слоях (см. рис. 3). Внедрение структурных элементов покрытия в подложку в процессе резания предположительно является структурной самоорганизацией системы "покрытие—подложка".

Снятие напряжений выравнивает свойства покрытий в приповерхностных слоях инструмента, за счет чего увеличивается работоспособность режущего инструмента.

При 427 °С происходит переход кобальта от α- к β-модификации, вследствие чего изменяется кристаллическая решетка (из гексагональной в кубическую гранецентрированную). Перестройка решетки — диффузионный процесс, что способствует проникновению покрытия в кобальтовую связку подложки. Предположительно, перед возникновением диффузионных потоков в зоне резания происходят структурные изменения между покрытием и подложкой.

Библиографический список

1. **Мигранов М.Ш.** Повышение износостойкости инструментов на основе прогнозирования процессов адаптации поверхностей трения при резании металлов: дис. ... д-ра техн. наук. М.: РУДН. 2007. 328 с.

2. **Мигранов М.Ш.** Повышение износостойкости инструментов на основе интенсификации процессов адаптации поверхностей трения при резании металлов. Уфа: Гилем, 2011. 229 с.

3. **Верещака А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.

4. **Криони Н.К., Мигранов М.Ш., Дементьева М.С., Мухамадеев В.Р.** Износостойкость многофункциональных покрытий при лезвийной обработке резанием // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20. № 2 (72). С. 29—33.

5. **Maier J., Prill S., Reichert B.** Solid state ionics. 1988. Vol. 28—30. P. 28.

6. **Шустер Л.Ш., Криони Н.К., Шолом В.Ю., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке. М.: Машиностроение, 2008. 318 с.

7. **Thermal** stability of nanostructured superhard coatings on the basic of TiN / S.V. Ovchinnikov et al., eds. N. Koval, A. Ryabchikov. // 9 Inter. Conference on Modification on Materials with Particles Beams and Plasma Flows. Tomsk. 2008. P. 472—478.

8. **Mitterer C., Mayrhofer P.H., Musil J.** Thermal stability of PVD hard coatings // Vacuum. 2005. Vol. 71. P. 279—284.

9. **Johnson D.l.** Ultra rapid sintering / Sintering and Heterogeneous Catalysis; eds. G.C. Kuczynski, A.E. Miller, G.A. Sargent // Plenum Publ. Corp. New-York. 1984. P. 243—252.

10. **Згалат-Лозинский О.Б., Рагуля А.В., Дуб Н.В.** Свойства нанокристаллических материалов на основе нитрида титана // Наноструктурное материаловедение. 2010. № 1. С. 30—38.

sb318.indd 142 06.03.2018 8:59:15

УДК 621.757

Ю.З. Житников, Б.Ю. Житников, *д-ра техн. наук,* **А.А. Клычев**
(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)
E-mail: ArsenLTD@yandex.ru

Необходимые и достаточные условия надежного закрепления узлов при сборке изделий в приспособлениях с резьбовыми прижимами

Обоснованы необходимые и достаточные условия надежного крепления изделий к неподвижной плите при выполнении сборочных операций, таких как затяжка резьбовых соединений, при этом на обработанных поверхностях изделий будут возникать только упругие деформации.

Justified necessary and sufficient conditions for reliable fastening articles to a stationary platen for assembly operations such as tightening threaded connections, while on the treated surface will experience only elastic deformation.

Ключевые слова: резьбовые соединения, затяжка, приспособление, условия закрепления, упругие деформации поверхностей.

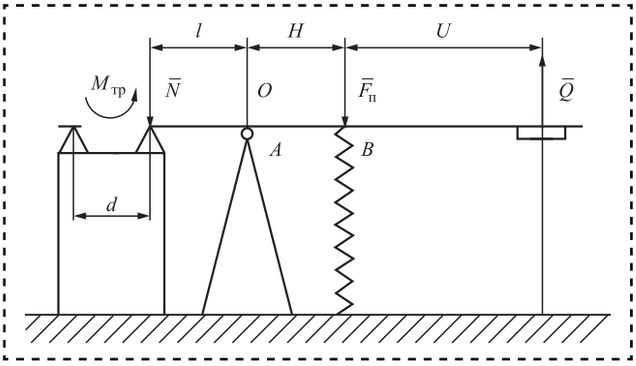
Keywords: threaded connection tightening, clamping device, necessary and sufficient conditions of fastening, elastic deformation of surfaces.

При ручной или механизированной сборке, особенно крупногабаритных изделий, где имеются операции завинчивания и затяжка резьбовых соединений, возникает необходимость крепления основания изделия к неподвижной плите при помощи приспособлений с резьбовыми прижимами (рисунок).

Если прижимы воздействуют на обработанную поверхность, то при значительных нагрузках могут возникнуть остаточные пластические деформации.

Для исключения этого явления обоснуем необходимые и достаточные условия надежного закрепления, при которых на взаимодействующих поверхностях прижима и изделия возникали бы только упругие деформации.

Необходимое условие надежного закрепления изделия к неподвижной плите обеспечивается при



Кинематическая схема приспособления

условии, если моменты трения от воздействия прижимов больше максимального момента при выполнении операции затяжки резьбовых соединений, т.е. при креплении соединяемых узлов и деталей:

$$M_{тр} > M_з, \quad (1)$$

где $M_{тр}$ — момент сил трения;

$M_з$ — момент затяжки резьбовых соединений при креплении деталей к узлу.

Момент трения равен:

$$M_{тр} = 2Nf\frac{d}{2}, \quad (2)$$

где N — сила нормального давления прижима;

f — коэффициент трения;

d — расстояние между прижимами.

С учетом выражения (2) и коэффициента запаса силы k:

$$N = k\frac{M_з}{fd}. \quad (3)$$

Достаточные условия упругого взаимодействия прижимов с поверхностью изделия (без появления на ее поверхности остаточных пластических деформаций) выполняются, если сила нормального давления прижима на поверхность меньше допустимого значения силы смятия:

$$N < F_{см}, \quad (4)$$

где $F_{см}$ находится из выражения:

$$\sigma_{см} = \frac{F_{см}}{S_{см}} \leqslant [\sigma_{см}]. \quad (5)$$

sb318.indd 143 06.03.2018 8:59:16

Учитываем, что при взаимодействии плоских прижимов с плоскостью изделия взаимодействие происходит по всей площади, тогда площадь взаимодействия равна:

$$S_{см} = 2ab, \quad (6)$$

где a — ширина прижима;

b — длина прижима.

Параметры "a" и "b" выбирают из конструктивных соображений.

С учетом выражений (3) и (6) окончательно выражение (4) можно записать:

$$[\sigma_{см}]2ab > k\frac{M_з}{fd};$$
$$kN = F_{см}; \quad (7)$$
$$k_1 N = [\sigma_{см}]2ab,$$

где k_1 — коэффициент запаса силы закрепления.

При выполнении условия (7) на поверхности изделия, взаимодействующей с прижимами, будут возникать только упругие деформации.

Найдем осевую силу затяжки резьбового соединения приспособления, при которой будет обеспечена требуемая сила нормального давления прижимов на поверхность изделия, исключающая поворот изделия при креплении соединяемых узлов и деталей.

На рычаг устройства закрепления изделия действуют внешние силы N (нормального давления), $F_п$ (сила упругости пружины), Q — осевая сила затяжки резьбового соединения приспособления.

Найдем момент сил относительно шарнира поворота рычага точки O (см. рисунок):

$$\sum m_{з(O)} = 0;$$
$$Nl - F_п H + Q(H + U) = 0. \quad (8)$$

Отсюда выразим осевую силу затяжки резьбового соединения приспособления:

$$Q = \frac{Nl - F_п H}{H + U}. \quad (9)$$

Сила упругости пружины равна:

$$F_п = c\delta, \quad (10)$$

где c — жесткость пружины;

δ — растяжение пружины при закреплении заготовки.

С учетом выражений (9) и (10) осевая сила затяжки резьбового соединения приспособления:

$$Q = \frac{[\sigma_{см}]\frac{2ab}{k}l - c\delta H}{H + U}. \quad (11)$$

Момент затяжки резьбового соединения приспособления находим из выражения (1):

$$M_з = Q\left[\frac{1}{3}\mu_т\frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} + \frac{d_2}{2}\tau_g\left(\frac{s}{\pi d_2} + \rho\right)\right], \quad (12)$$

где $\mu_т$ — коэффициент трения на торце головки болта или гайки;

D — средний диаметр головки болта или гайки (размер под гаечный ключ);

d — диаметр тела болта;

τ_g — коэффициент трения в резьбе;

d_2 — средний диаметр резьбы;

s — шаг резьбы;

ρ — угол трения в резьбе.

С учетом выражения (11) момент затяжки резьбового соединения приспособления:

$$M_з = \frac{[\sigma_{см}]\frac{2ab}{k}l - c\delta H}{H + U}\left[\frac{1}{3}\mu_т\frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} + \frac{d_2}{2}\tau_g\left(\frac{s}{\pi d_2} + \rho\right)\right]. \quad (13)$$

Учитывая, что резьбовое соединение приспособления затягивают ключом, момент затяжки равен:

$$M_з = Pl, \quad (14)$$

где P — сила, прикладываемая к ключу рабочим;

l — длина плеча ключа.

Стандарт устанавливает силу $P = 200$ Н. Для точной и надежной затяжки резьбового соединения следует использовать моментный ключ.

Следовательно, доказаны необходимые и достаточные условия надежного закрепления собираемого узла к неподвижной плите при помощи приспособлений с резьбовыми прижимами.

Библиографический список

1. **Яблонский А.А., Никифоров В.М.** Курс теоретической механики: учебник. М.: КНОРУС, 2011. 608 с.

2. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю.** Технологическая оснастка. Расчет и проектирование: учебное пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 204 с.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 10.01.2018. Подписано в печать 01.03.2018. 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.

sb318.indd 144 06.03.2018 8:59:16