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

10 2016 (195)

СОДЕРЖАНИЕ

Технологическая оснастка для сборки

Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Пронин А.И., Щелкунова М.Е., Марьин Б.Н. Повышение производительности обработки на сверлильно-фрезерно-расточных станках с ЧПУ за счет применения приспособления со съемной опорой . . . 3

Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Блинов С.В. Одношпиндельный шпильковерт на основе центробежных сил инерции с контролем затяжки по моменту . . . 5

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Бойчук М.И., Микаева С.А. Сборка кварцевых генераторов . . . 7

Трение и смазка в машинах и механизмах

Измайлов В.В., Новоселова М.В. Трибологические свойства тонких пленок жирных кислот . . . 12

Болдырев Д.А., Попова Л.И., Сафронов Н.Н. О некоторых проблемах материаловедения в трибологии . . . 17

Юнусходжаев С.Т. Износостойкость подшипников скольжения, работающих в среде переменного нагружения . . . 20

Иргашев А.И., Иргашев Б.А. Оценка износа деталей агрегатов машин по содержанию продуктов износа в масле . . . 23

В помощь конструктору, технологу

Березин С.Я., Карпов А.Р. Энергетический принцип оценки стопорящих свойств резьбовых соединений с волнистым профилем витков одной из деталей . . . 31

Каримбаев Т.Д., Рапилбекова Н.С. Математическое моделирование периодически изменяющегося трехмерного температурного поля в многослойных цилиндрах . . . 35

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

Тел.: 8 (499) 269-54-98. Факс 8 (499) 269-48-97

E-mail: sborka@mashin.ru

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

Председатель редакционного совета

Ф.М. МИТЕНКОВ, *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.
А.В. МЕДАРЬ, д.т.н.
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.
А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД
Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

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

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

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

КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

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

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

НИЖНИЙ НОВГОРОД
С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК
В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

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

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

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

РОСТОВ-НА-ДОНУ
В.И. КОЛЕСНИКОВ, акад. РАН и РИА (зам. гл. редактора)
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", 2016

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

10 2016 (195)

CONTENTS

Technological equipment for assembly

Shchelkunov E.B., Vinogradov S.V., Pronin A.I., Shchelkunova M.E., Maryin B.N. Increased processing performance on drilling, milling and boring CNC machines through the use of devices with removable support 3

Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Blinov S.V. Single-spindle stud driver on the basis of centrifugal forces of inertia with control of an inhaling on the moment 5

Quality assurance. Testing. Monitoring

Boichuk M.I., Mikaeva S.A. Build crystal oscillators 7

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Izmailov V.V., Novoselova M.V. The tribological properties of fatty acids thin films 12

Boldyrev D.A., Popova L.I., Safronov N.N. About some problems in material science of tribology 17

Yunuskhodzhaev S.T. Wear firmness of slide bearings operating in an environment variable loading 20

Irgashev A.I., Irgashev B.A. Evaluation of wear parts units machines content of the product oil wear 23

Industrial and design engineer's aid

Berezin S.Ya., Karpov A.R. Energy principle evaluation locking properties of screw joints with wavy surface one of the parts 31

Karimbaev T.D., Rapilbekova N.S. Mathematical modeling periodically changing three-dimensional temperature field in multilayered cylinders 35

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency — **79748**, the union catalogue "Pressa Rossii" — **84967**, the catalogue "Pochta Rossii" — **60257**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: 8 (499) 269-54-98. Fax: 8 (499) 269-48-97.
http://www. mashin.ru E-mail: sborka@machin.ru
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

Chair of Editorial Advisory Board —
Member of Russian Academy of Science
F.M. MITENKOV

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
A.V. MEDAR'
E.A. MIKRIN
B.V. SHANDROV
A.G. KHOLODKOVA

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N.KULSHIN
A.A. SUPONIA

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

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

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

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

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

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OMSK
V.N. KOSTYUKOV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

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

PERM
S.M. BELOBORODOV
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", 2016

УДК 621.9.05

Е.Б. Щелкунов, С.В. Виноградов, А.И. Пронин,
М.Е. Щелкунова, *канд-ты техн. наук,* **Б.Н. Марьин,** *д-р техн. наук*
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)
E-mail: office@knastu.ru

Повышение производительности обработки на сверлильно-фрезерно-расточных станках с ЧПУ за счет применения приспособления со съемной опорой

Рассмотрено приспособление для станков сверлильно-фрезерно-расточного типа, применение которого способствует снижению оперативного времени технологической операции за счет исключения необходимости подналадки станка для привязки системы координат заготовки к системе координат станка.

Powered device accessories for machine tools drilling, milling and boring type, the use of which reduces the operational time of technological operations by eliminating the need to configure the machine to bind the workpiece coordinate system to the machine coordinate system.

Ключевые слова: приспособление, система координат, подналадка, заготовка.

Keywords: device, coordinate system, tuning, preparation.

В современном самолетостроении применяется большой объем деталей, изготавливаемых методом механической обработки. Значительную долю общего числа деталей самолета составляют корпусные детали, поэтому максимальная часть технологических операций выполняется на станках с ЧПУ сверлильно-фрезерно-расточного типа.

Существенную часть общей номенклатуры деталей самолета изготавливают малыми партиями, что присуще мелкосерийному и единичному производству.

При мелкосерийном и единичном типах производства для базирования заготовок небольших корпусных деталей на станках часто применяют универсальные машинные тиски. Под базированием заготовки при обработке на станке с числовым программным управлением (ЧПУ) понимается лишение ее шести степеней свободы относительно нулевой точки станка [1].

Перед обработкой заготовок на станках с ЧПУ требуется привязка системы координат заготовки (рабочей системы координат) к системе координат станка.

Установочные элементы тисков для базирования заготовок — опорная поверхность направляющей, на которую заготовка опирается наибольшей по площади поверхностью (установочная база), и неподвижная губка тисков, контактирующая с наибольшей по протяженности поверхностью (направляющая база) заготовку. Эти установочные поверхности тисков лишают заготовку пяти степеней свободы и обеспечивают однозначное положение каждой устанавливаемой заготовки в направлении двух координатных осей станка.

Положение третьей поверхности (опорная база), перпендикулярной двум предыдущим поверхностям заготовки в тисках, конструктивно не определено. Лишение заготовки шестой степени свободы обеспечивается силой зажима губок тисков. В связи с этим перед обработкой второй и всех последующих заготовок в тисках требуется выполнение подналадки, заключающейся в привязке системы координат заготовки к системе координат станка по оси (координате), перпендикулярной опорной базе заготовки.

Время, затраченное на подналадку (вспомогательное время), входит в оперативное время выполнения операции и учитывается при вычислении себестоимости готовой продукции. Применяют специализированную и универсальную оснастку, позволяющую повысить эффективность технологических операций путем сокращения вспомогательного времени на авиастроительных предприятиях [2—4].

При взаимодействии кафедры "Технология машиностроения" ФГБОУ ВПО "КнАГТУ" и ПАО "КнААЗ им. Ю.А. Гагарина" в рамках базовой

sb1016.indd 3 12.10.2016 10:34:12

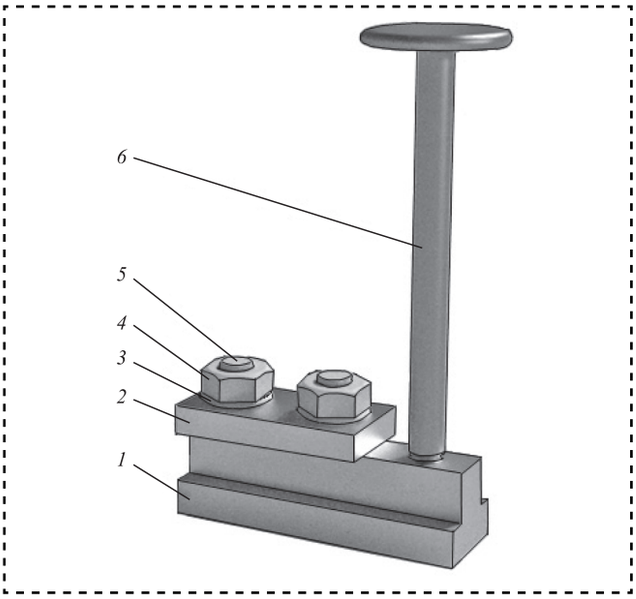


Рис. 1. Приспособление

кафедры разработано приспособление, позволяющее сократить оперативное время за счет исключения необходимости привязки системы координат заготовок в партии к системе координат станка. Конструкция приспособления проста и технологична, его изготовление и эксплуатация не требуют больших капиталовложений.

Приспособление является съемной опорой (установочным элементом), с помощью которой обеспечивается положение заготовки относительно третьей координаты в системе координат станка. Оно состоит из корпуса (сухаря) *1*, устанавливаемого в паз стола и закрепляемого с помощью планки *2*, шпилек *5*, шайб *3* и гаек *4*. Съемный палец *6*, устанавливаемый в коническое отверстие в корпусе, представляет собой опору, с которой контактирует опорная база заготовки (рис. 1).

Для обеспечения высокой точности устройство базируется и закрепляется в пазе стола станка по скользящей посадке. Точность изготовления элементов приспособления обеспечивает необходимую точность базирования заготовки. До установки заготовки осуществляют привязку инструмента к нулевой точке заготовки по двум осям (координатам), перпендикулярным к установочной и направляющей базам заготовки.

На рис. 2 показана конструкция съемного пальца, состоящая из посадочного конуса *1*, тела *2*, длину которого определяют высотой применяемых тисков и опорного базирующего элемента с периферийной рабочей поверхностью *3*.

Заготовку устанавливают в тиски и упирают в периферийную поверхность пальца (см. рис. 2), что обеспечивает базирование заготовки по трем координатным осям, образующим координатный угол.

Для привязки системы координат заготовки к системе координат станка применяют эталонную деталь, установленную в тисках с упором в периферийную рабочую поверхность съемного пальца. Привязку систем координат по эталонной детали выполняют единожды перед началом обработки партии заготовок, и в дальнейшем привязка уже не требуется.

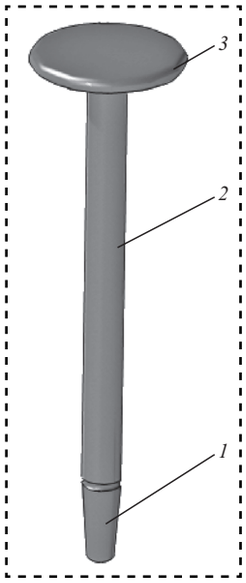


Рис. 2. Съемный палец

При необходимости обеспечения доступа инструмента к поверхности заготовки, выбранной в качестве опорной базы, после закрепления заготовки съемный палец извлекают из посадочного отверстия в корпусе.

Для обработки каждой из последующих заготовок в партии перед их установкой в тиски съемный палец устанавливают в посадочное отверстие корпуса. При упоре заготовок в рабочую поверхность пальца они занимают такое же положение в системе координат станка, что и первая заготовка.

Применение указанного устройства позволяет сократить время операции и тем самым повысить производительность обработки.

На рис. 3 показано время обработки заготовки детали "корпус" (выбранной случайным образом) на пятикоординатном станке DMU 50 ECOLINE, приведенное к размеру партии обрабатываемых заготовок.

На рис. 4 показано время обработки партии деталей "корпус" в зависимости от размера партии обрабатываемых заготовок. Видно существенное повышение производительности обработки при использовании приспособления.

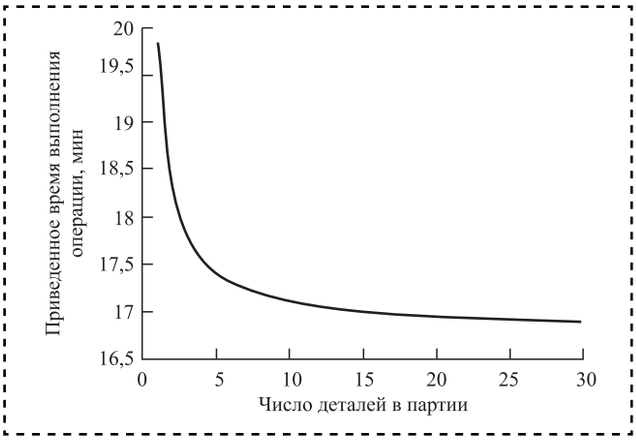


Рис. 3. Зависимость приведенного времени выполнения сверлильно-фрезерно-расточной операции обработки заготовки детали "корпус" от размера партии обрабатываемых заготовок

sb1016.indd 4 12.10.2016 10:34:12

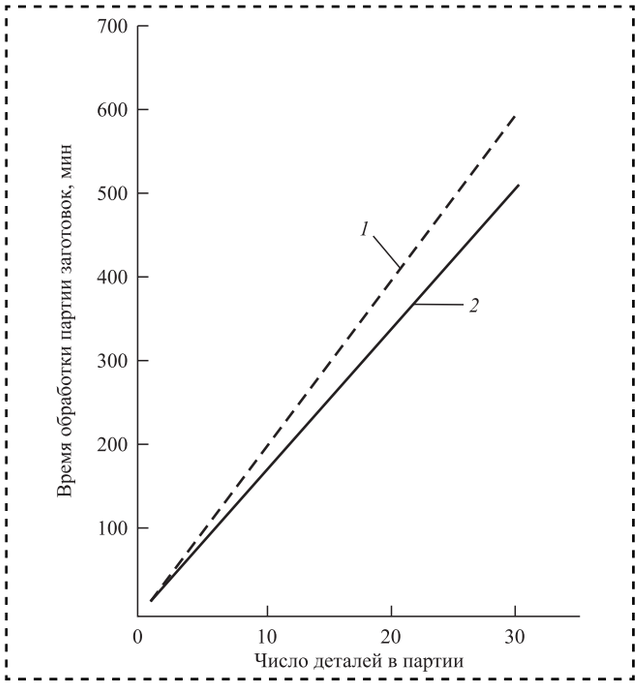


Рис. 4. Зависимость времени изготовления детали "корпус" от числа деталей в партии:
1 — без использования приспособления; *2* — с использованием приспособления

С учетом того, что время обработки на станке одной заготовки составляет около 20 мин, при обработке 30 заготовок с использованием предлагаемого приспособления выигрыш по времени составляет около 88 мин.

Заключение

Применение приспособления позволило существенно повысить производительность обработки на станках с ЧПУ за счет исключения необходимости подналадки станка при обработке партии заготовок.

Приспособление применено в технологическом процессе ПАО "КнААЗ им. Ю.А. Гагарина".

Изготовление и эксплуатация приспособления требуют минимальных экономических затрат.

Библиографический список

1. **Шишмарев В.Ю.** Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник для вузов. М.: Издательский центр "Академия", 2007. 368 с.

2. **Устройство** для обжима конца трубы / Б.Н. Марьин и др. // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2013. Т. 1. № 4 (16). С. 4—7.

3. **Марьин Б.Н., Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Марьин С.Б.** Универсальный инструмент для обработки отверстий под высокоресурсные болтовые соединения в самолетостроении // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2014. Т. 1. № 1 (17). С. 10—12.

4. **Современные** технологии агрегатно-сборочного производства самолетов / А.И Пекарш и др. М.: Аграф-пресс, 2006. 304 с.

УДК 621.757

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

Одношпиндельный шпильковерт на основе центробежных сил инерции с контролем затяжки по моменту

Представлена кинематическая схема одношпиндельного шпильковерта на основе центробежных сил инерции.
The kinematic scheme of the single-spindle stud driver on the basis of centrifugal forces of inertia is submitted.

Ключевые слова: кинематическая схема, шпильковерт, центробежные силы инерции.
Keywords: kinematic scheme, stud driver, centrifugal forces of inertia.

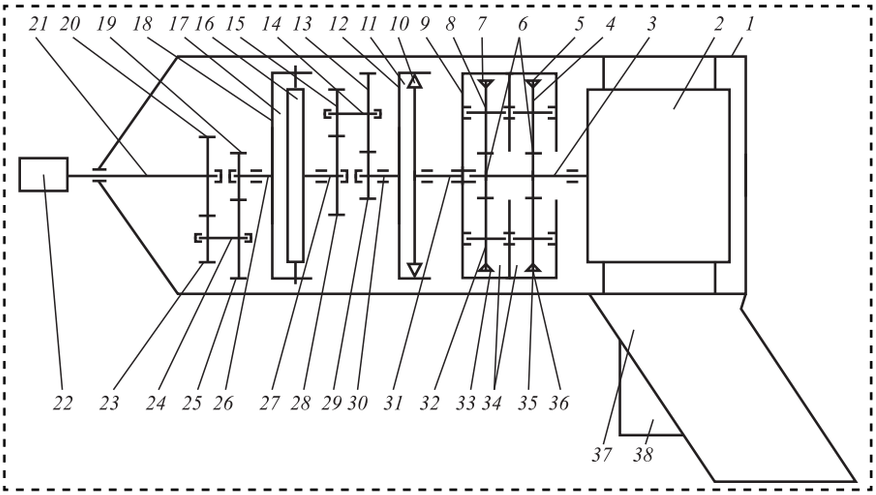
Введение

Для завинчивающих устройств прямого и ударного действия требуются как электрические, так и пневматические двигатели относительно большой мощности и габаритов.

Альтернативным завинчивающим устройством является одношпиндельный гайковерт на основе поршневого двигателя.

Предлагается завинчивающее устройство (одношпиндельный шпильковерт) на основе центробежных сил инерции с контролем качества затяжки

sb1016.indd 5 12.10.2016 10:34:13



Кинематическая схема одношпиндельного шпильковерта

по моменту за счет отключения вращения шпинделя при помощи муфты предельного момента, в котором используется электродвигатель малой мощности, так как для данных устройств важна только высокая частота вращения импульсатора (рисунок).

Шпильковерт состоит из двигателя *2*, совмещенного с редуктором, двух импульсаторов *34*, механизма свободного хода *11* храпового типа, зубчатых передач *29*, *13* и *15*, *28*, муфты предельного момента *17* зубчатого (кулачкового) типа, зубчатых передач *19*, *25* и *23*, *20*, шпинделя *21* и патрона *22* для удержания шпильки в процессе ее завинчивания и затяжки. Все элементы шпильковерта помещены в корпус *1*, снабженный рукояткой *37*.

Шпильковерт работает следующим образом. Предварительно вручную шпилька наживляется в резьбовое отверстие узла. Патрон *22* разрезными резьбовыми кулачками захватывает шпильку за резьбу. Оператор нажимает на курок *38*. Начинает вращаться выходной вал *3* двигателя *2*. Выходной вал *3* жестко связан с центральным валом импульсаторов, на котором закреплены центральные шестерни *6*. Вращение от шестерен передается на сателлиты *4*, *8*, *32*, *35*, на которых расположены неуравновешенные грузики *5*, *7*, *33*, *36*.

При вращении сателлитов возникают центробежные силы инерции. Пары сателлитов *4*, *35* и *8*, *32* в положении, перпендикулярном рисунку, образуют пару сил относительно оси водила *9*, на который передается осями сателлитов. В одном положении формируется положительный импульс момента сил, направленный в сторону завинчивания резьбовой детали, а в противоположном положении формируется отрицательный импульс момента сил, направленный в сторону отвинчивания.

Положительный момент импульса через водило *9* и вал *31* поворачивает обойму *10* с подпружиненными собачками, которые взаимодействуют с зубьями храпового колеса *12*, поворачивая вал *30*, зубчатые передачи *29*, *13* и *15*, *28*, вал *14* и далее ведущую полумуфту *16* муфты предельного момента *17*. Ведущая полумуфта *16* поджата пружиной (условно не показана) и может перемещаться вдоль вала *27*. За счет взаимодействия зубьев полумуфт поворачивается ведомая полумуфта *18*, на валу *26* которой закреплена шестерня *19*, взаимодействующая с зубчатым колесом *25*, вращение от которого через вал *24*, зубчатую пару *23*, *20* передается на шпиндель *21* к патрону *22*, взаимодействующему со шпилькой. Шпилька поворачивается на некоторый угол.

При воздействии на водило *9* отрицательного импульса момента сил оно вместе с обоймой *10* с собачками поворачивается в противоположном направлении. Подпружиненные собачки проскальзывают по зубьям храпового колеса *12*, не передавая ему вращения.

Процесс передачи положительных моментов импульсов продолжается до тех пор, пока не произойдет завинчивание и затяжка шпилек. При достижении требуемого значения момента затяжки шпилек срабатывает муфта предельного момента. Начинают проскальзывать полумуфты *16*, *18* и прекращается передача вращения на шпиндель к резьбовой детали.

Процесс завинчивания и затяжки шпильки завершен. Оператор отпускает курок *38*, останавливая работу двигателя. Резьбовые кулачки патрона *32* снимаются к завинченной шпильке.

Параметры элементов шпильковерта и затяжки резьбовых соединений

Радиус сателлитов $r_с$, см	1,5
Радиус центральной инерции $r_ц$, см	0,5
Масса неуравновешенного грузика m, кг	0,03
Частота вращения сателлита $n_с$, мин$^{-1}$	150
Суммарное передаточное отношение i_Σ	86,2
Передаточные отношения:	
$i = \frac{z_{15}}{z_{28}}$	3
$i = \frac{z_{19}}{z_{25}}$	3
$i = \frac{z_{23}}{z_{20}}$	3
$i = \frac{z_{29}}{z_{13}}$	3,2
Требуемый момент затяжки $M_з$, кг·м	0,036
Действительный момент затяжки $M_з$, кг·м	0,039

Шпильковерт показал надежную и стабильную работу, и он может найти применение в современном производстве.

Библиографический список

1. **Пат. 156798 Российская Федерация B25B 21/00.** Инерционный шпильковерт / Ю.З. Житников, Б.Ю. Житников, Ю.Н. Можегова, С.В. Блинов; опубл. 20.11.2015. Бюл. № 23.

2. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Матросова Ю.Н.** Инерционный гайковерт // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 10. С. 26—27.

sb1016.indd 6 12.10.2016 10:34:13

УДК 621.373.5

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

Сборка кварцевых генераторов

Изготовлена макетная партия термокомпенсированных кварцевых генераторов ГК-362 на заданную частоту 12 000 750 Гц. Описан алгоритм отбраковки кварцевых элементов и микросхем, а также получены характеристики параметров чипов, необходимые для улучшения качества процесса компенсации. Проведены комплексные испытания готовых сборок.

Сформулированы условия к резонатору и кристаллу, позволяющие выполнить термокомпенсацию. Даны рекомендации для производства более качественных изделий.

Made a mock-party temperature-compensated crystal oscillators GC-362 at a predetermined frequency 12 000 750 Hz. On the main party resonators has been developed rejection algorithm and the data obtained after the tests of the characteristics of chips to improve the process parameters of temperature compensation products. On the product carried out comprehensive tests.

Terms are formed to the resonator and crystal allowing to perform temperature compensation. Recommendations for the production better-quality resonators.

Ключевые слова: термокомпенсация, кварцевый генератор, емкость, частота, перестройка, резонатор.

Keywords: temperature compensation, crystal oscillator, capacity, frequency, alteration, resonator.

Кварцевые генераторы находят широкое применение в различных областях техники, в том числе в устройствах генерирования и формирования радиосигналов, в телекоммуникационных и навигационных системах, космической технике, системах сбора и обработки информации, устройствах мобильной связи, микропроцессорах и др. Использование кварцевых генераторов в навигационном оборудовании и космической аппаратуре предъявляет к ним высокие требования по стабильности частоты в широком диапазоне температур, к массогабаритным характеристикам и энергопотреблению [1, 2].

В настоящее время в термокомпенсированных кварцевых генераторах с резонаторами АТ-среза реализована температурная стабильность частоты $\Delta f/f = \pm(1...5)\cdot 10^{-6}$ [3]. На практике производство таких высокостабильных генераторов связано со значительными трудностями вследствие немонотонности температурно-частотных характеристик (ТЧХ) кварцевых резонаторов. Обычно это выражается в скачке частоты ТЧХ при определенных температурах. Вероятность возникновения скачка частоты зависит от многих факторов: частоты резонатора (толщины пьезоэлектрической пластины), его конструктивных особенностей, технологии изготовления, качества применяемого кварца и др.

Для качественной термокомпенсации необходимы удовлетворяющие всем параметрам кварцевые элементы. Для получения первой партии резонаторов сформированы первичные требования: частота настройки — 11 999 820 Гц; емкость настройки — 9 пФ.

Пробная партия резонаторов состояла из 22 изделий. Из них по разным причинам в брак попали 8 шт., после чего разброс частоты при температуре −20 °С сократился с ±53 до ±13,5 ppm, при таких отклонениях возможна термокомпенсация.

Экспериментальные результаты пробной партии резонаторов

	До отбраковки	После отбраковки
Число резонаторов	22	14
Частота, Гц	11 999 820	12 000 650
Емкость, пФ	11	8,6
Разброс по частоте, ppm:		
при 25 °С	±48	±12,5
при −20 °С	±53	±13,5

sb1016.indd 7 12.10.2016 10:34:13

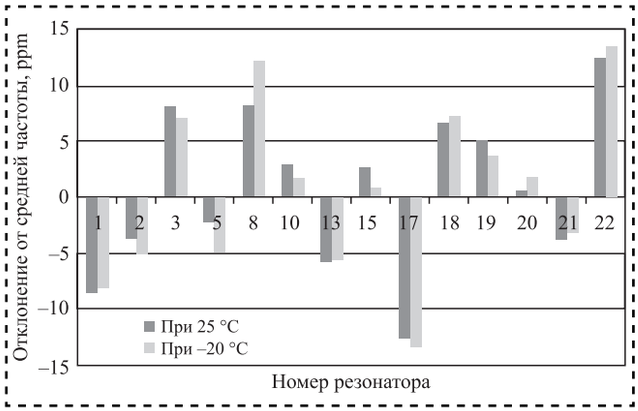


Рис. 1. Диапазон разброса частот в партии при разных температурах

Для получения качественных сборок отбракованы при помощи программы Can2Din неподходящие резонаторы по следующим параметрам: сопротивление, угол среза и частота.

На рис. 1 представлен диапазон разброса частот в партии при разных температурах. Диапазон разброса примерно постоянный при всех температурах. Максимальный разброс при температуре −20 °С не превышает ±13,5 ppm.

Второй составляющей качественной термокомпенсации является микросхема К5860ГН2Н4. Изменение частоты в ней происходит благодаря трем изменяемым емкостям: варикапу термокоменсации (PP), магазину емкостей (CCCF), варикапу внешней подстройки (Vc), где PP и Vc — динамически изменяемые емкости. Емкость PP — перестраивается за счет напряжения цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и формируется полиномом термокомпенсации с учетом цифрового значения температуры; Vc — изменяется за счет напряжения управления и используется для компенсации старения; CCCF — магазин емкостей, который подбирается при настройке, прожигается и далее остается неизменным.

В табл. 1 приведены значения емкости для каждого из корректирующих элементов при разном напряжении питания генератора. При измерениях разброс значений емкостей каждого из элементов перестройки у одного чипа при одном напряжении связан с изменением дополнительно подключенных емкостей. Для напряжения 3,3 В перестройка от PP меняется от 2,22 до 2,27 пФ, что составляет ±0,03 пФ от среднего значения. Минимальное значение получается при отключенных дополнительных емкостях (CCCF и Vc), а максимальное — при подключении всех емкостей. Таким образом, перестройка от варикапа термокомпенсации варьируется в пределах 2,6 % от среднего значения.

Таблица 1

Значения емкости, пФ, для каждого из корректирующих элементов при разном напряжении генератора

Емкость	Напряжение питания, В	
	3,3	5
PP	2,25 ± 0,03 (2,6 %)	2,32 ± 0,02 (1,8 %)
CCCF	0,6 ± 0,02 (6,3 %)	0,6 ± 0,01 (4,1 %)
Vc	0,31 ± 0,01 (7,9 %)	0,39 ± 0,01 (7,3 %)

Зависимость изменения частоты от напряжения на варикапе очень важна для улучшения качества работы алгоритма настройки генератора (рис. 2). При помощи дополнительного программного оборудования данные снимали с шагом 10 единиц по шкале цифрового кода.

При минимальном значении цифрового кода 0 перестройка частоты минимальна, при максимальном значении цифрового кода 4095 — максимальна. Зависимость изменения частоты от изменения напряжения на варикапе нелинейная. Нелинейность отчетливо проявляется при значениях кода компенсации от 0 до 250 единиц, далее изменение приобретает более плавный характер. Исходя из этого, рационально выбирать коридор термокомпенсации подбором соответствующей емкости магазина емкостей CCCF так, чтобы не использовать первые 250 единиц PP. Магазин емкостей CCCF состоит из 15 подключаемых емкостей CC с большим шагом (перестройка 14 ppm) и 63 емкостей CF с мелким шагом (перестройка 2 ppm). Это обеспечивает высокую точность и большой диапазон настройки (16 ppm).

Магазин емкостей позволяет сдвинуть кривую ТЧХ вниз, обеспечивая наиболее оптимальное позиционирование ТЧХ относительно заданной частоты настройки.

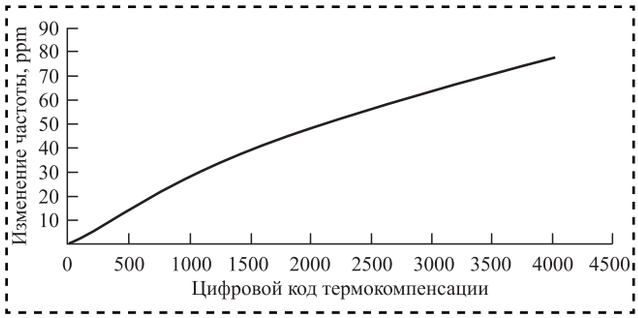


Рис. 2. Зависимость изменения частоты от напряжения на варикапе

sb1016.indd 8 12.10.2016 10:34:13

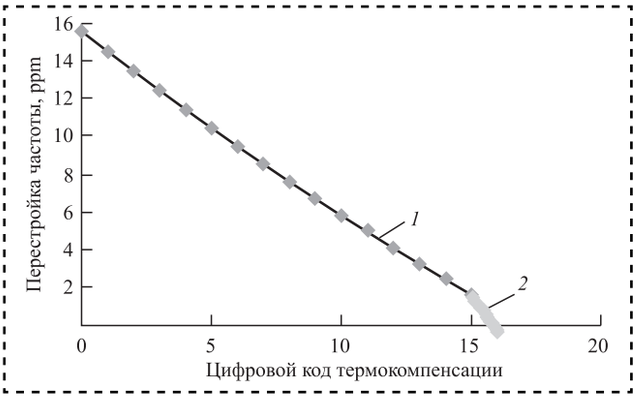


Рис. 3. Перестройка частоты от CCCF:
1 — за счет CC; *2* — за счет CF

На рис. 3 отражены магазины емкостей CC и CF. Емкость всего магазина CF дает перестройку, сопоставимую с двумя шагами магазина CC. На рис. 4 отражены перестройки частоты от изменения CF при граничных значениях CC. Перестройка уменьшается с увеличением CC, а соответственно, и с увеличением частоты. Это позволяет сделать вывод о большем эффекте от CCCF для нижней части ТЧХ.

Варикап Vc используется для компенсации процесса старения кварцевого элемента (табл. 2). Перестройка в генераторах с напряжением питания 3,3 В меньше за счет того, что Vc меняется от ноля до напряжения питания, а минимальное и максимальное значения перестройки обусловлены съемом изменения частоты при минимальных и максимальных емкостях PP и CCCF.

В ходе испытаний смонтированной продукции выявлен брак генератора по причине неработоспособности микросхемы. Для повышения процента выхода годной продукции принято решение браковать негодные к термокомпенсации

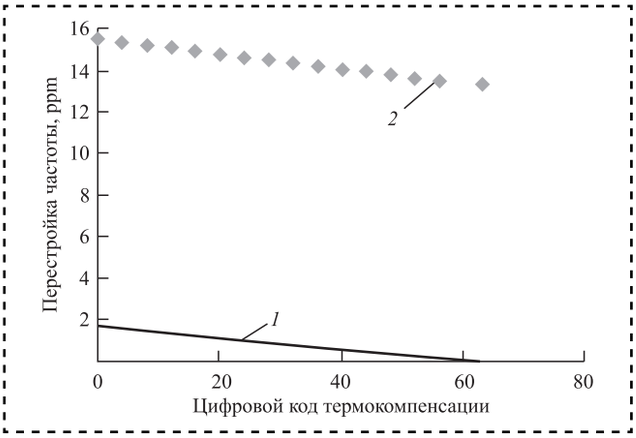


Рис. 4. Перестройка частоты от CF:
1 — при CC = 15; *2* — при CC = 0

Таблица 2

Перестройка частоты за счет варикапа Vc при разном напряжении питания в нормальных условиях

Напряжение, В	Перестройка частоты, ppm		Среднее напряжение, В
При температуре 25 °C			
3,3	Min	Max	1,1
	8	11	
5	10	14	1,6
При температуре −20 °C			
3,3	Средняя		1,1
	10		
5	13		1,5

чипы, которые составляют 10...15 % от общего числа.

Для проверки чипов, на которых не смонтирован резонатор, необходимо при помощи колодки прижать тестовый резонатор с напаянными золотыми проволочками к корпусу микросхемы. После чего при помощи программы оценить работоспособность по трем критериям. При несоблюдении одного из критериев чип признается негодным (табл. 3).

У отбракованных микросхем измерена эквивалентная емкость. Среднее значение емкости для партии из 15 микросхем — 8,6 пФ. Именно по этой причине настройку кварцевых элементов ведут при емкости нагрузки 8,6 пФ. На рис. 5 график нормального распределения отображает зависимость процента годных от выбранного диапазона емкости. Также видно влияние отклонения емкости чипа на уход частоты у генератора.

Таблица 3

Виды брака в микросхемах (10...15 % от партии)

Вид брака	Причина
Не запускается генератор	Трудно определить конкретную причину. Дальнейшее использование микросхемы невозможно
Плохая перестройка	Эквивалентная емкость некоторых микросхем не обеспечивает должную перестройку
Ломаная ТЧХ	Некоторые из регистров микросхемы, отвечающие за перестройку по варикапу PP, не работают, поэтому при определенных значениях на выход подается некорректное напряжение

sb1016.indd 9 12.10.2016 10:34:13

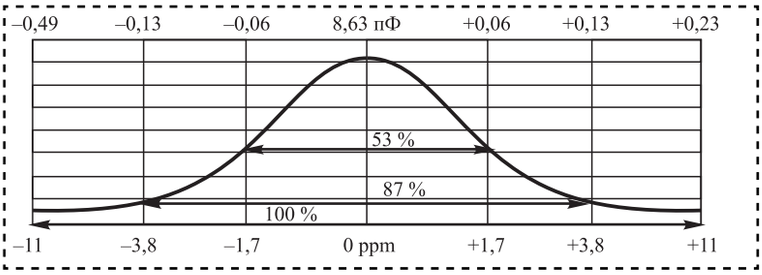


Рис. 5. Нормальное распределение зависимости выхода годных от диапазона емкостей

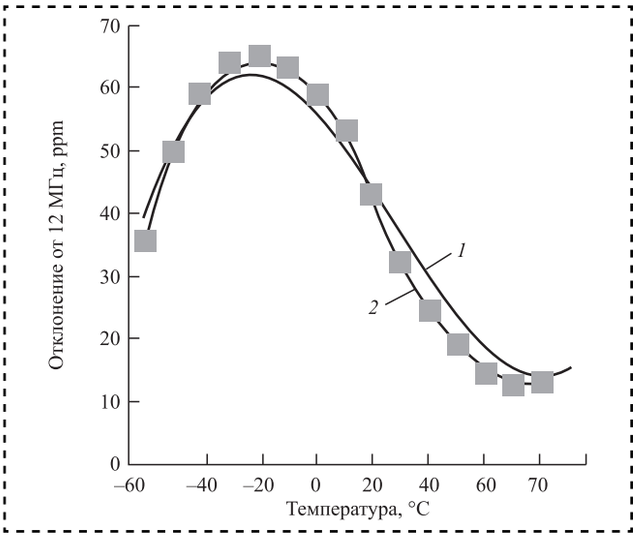


Рис. 6. Сравнение усредненной ТЧХ всей партии до и после монтажа:
1 — генератор; *2* — резонатор

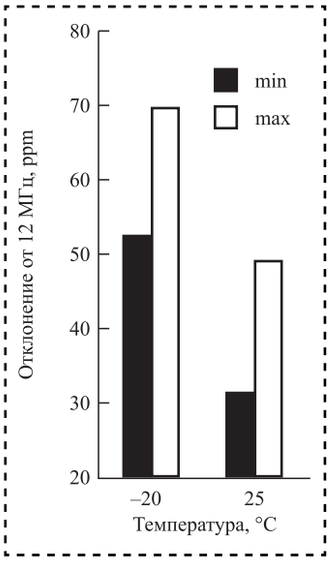


Рис. 7. Разброс ТЧХ партии при температурах

Интервал эквивалентной емкости ±0,13 пФ обеспечивает хороший процент выхода годных (87 %) и незначительное отклонение по частоте (±3,8 ppm). Такое отклонение при C1 = 6,13 пФ не скажется принципиально на возможности термокомпенсации.

Монтаж резонатора осуществляли пайкой в инфракрасной печи при утвержденном температурном режиме с выдержкой на максимальной температуре в течение 30 с. При этом происходит термоудар, оказывающий незначительное влияние на параметры устройства.

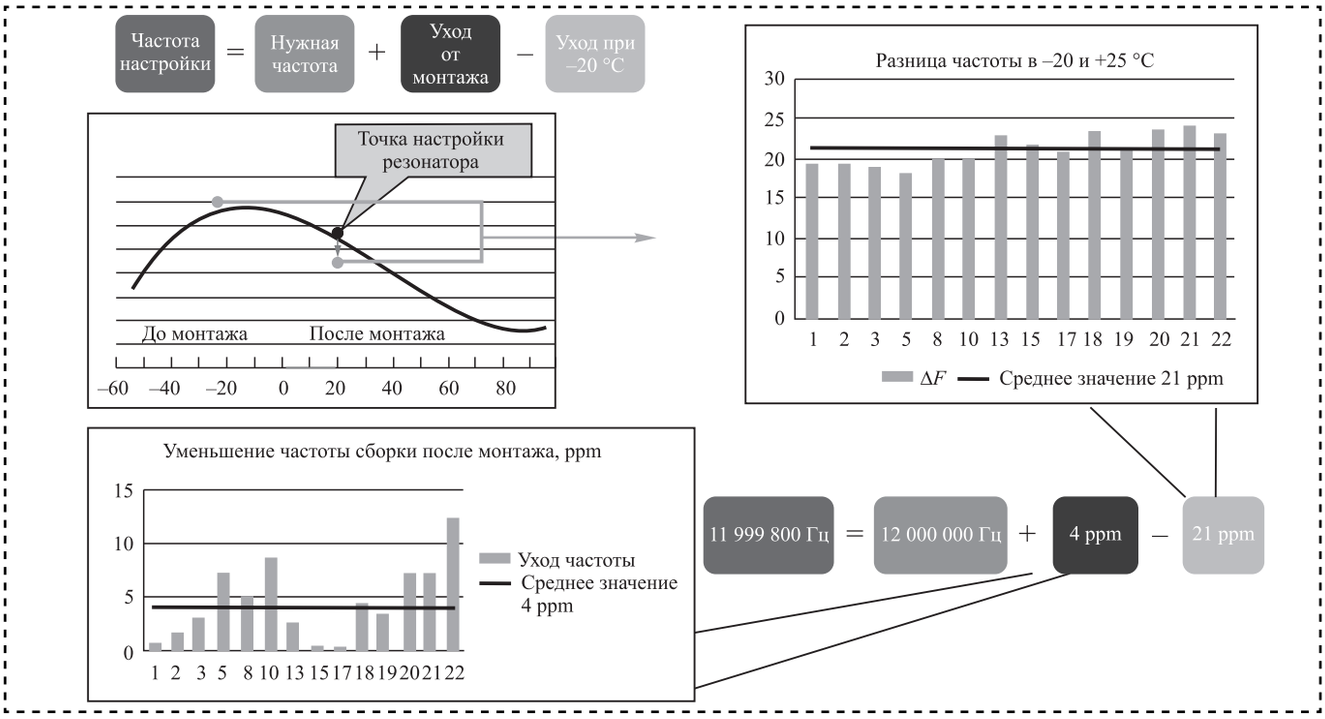


Рис. 8. Алгоритм выбора частоты настройки

sb1016.indd 10 12.10.2016 10:34:14

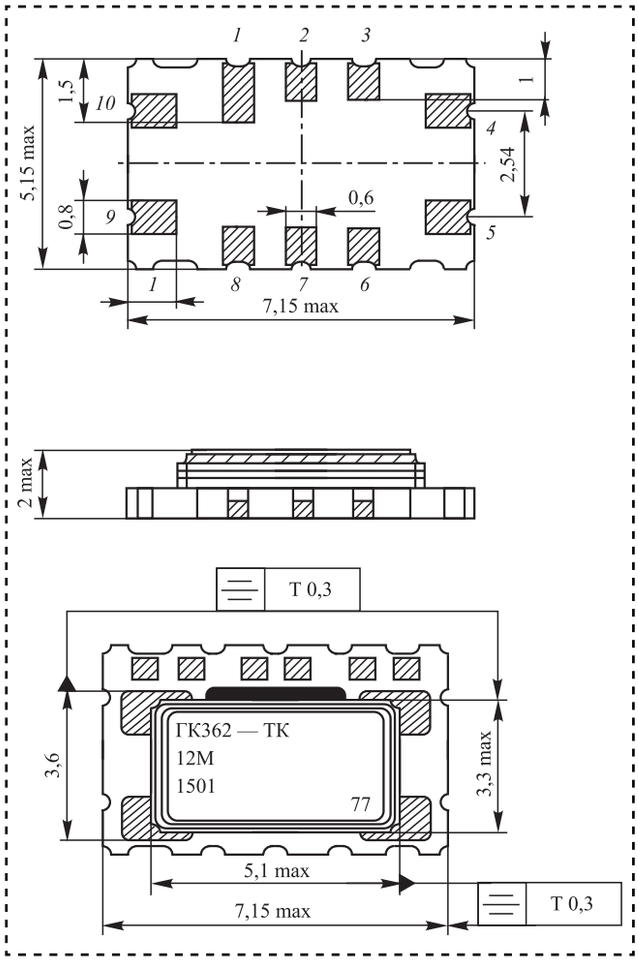


Рис. 9. Готовая сборка термокомпенсированного кварцевого генератора в SMD-корпусе

Процесс сборки генератора положительно влияет на параметры конечного устройства. После сборки коридор разброса ТЧХ всей партии уменьшился (рис. 6 и 7).

У партии готовых сборок разброс по частоте при разных температурах сопоставим и меньше разброса партии резонаторов. Рекомендуемая частота настройки резонаторов 11 999 800 Гц. Алгоритм выбора частоты настройки показан на рис. 8.

Используя данную методику подбора резонаторов, можно получить долговременную нестабильность частоты порядка $\Delta F/F = \pm 5 \cdot 10^{-6}$ за 15 000 ч для термокомпенсированных кварцевых генераторов в SMD-корпусе (рис. 9).

Библиографический список

1. **Альтшуллер Г.Б., Елфимов Н.Н., Шикулин В.Г.** Кварцевые генераторы: справочное пособие. М.: Радио и связь, 1984. С. 100—121.

2. **Международная** научно-техническая конференция "Инновационные технологии в науке, технике и образовании": сб. трудов / Ю.В. Гуляев, В.С. Кондратенко Т. 1. М., 2009. С. 91—95.

3. **Пат. 2311726 РФ,** МПК[7] H 03 B5/32. Термостатированный высокостабильный генератор / А.В. Рогозинский, В.П. Литвинов, И.В. Финкель, С.С. Пашков, А.М. Васильев, М.Ю. Овчинников; опубл. 27.11.2007.

sb1016.indd 11 12.10.2016 10:34:14

УДК 531.43

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

Трибологические свойства тонких пленок жирных кислот

Исследовано влияние тонких пленок жирных кислот с различной длиной молекул на коэффициент трения и параметры удельной силы трения в паре трения сталь—сталь. Проанализированы зависимости коэффициента трения и удельной силы трения от нагрузки и параметров молекул смазочных материалов.

Influence of thin films of fatty acids with various length of molecular on friction coefficient and specific friction force in steel—steel friction pair is investigated. Dependences of friction coefficient and specific friction force on load and molecular parameters of lubricants are discussed.

Ключевые слова: коэффициент трения, удельная сила трения, жирные кислоты.

Keywords: friction coefficient, specific friction force, fatty acids.

Тенденция миниатюризации и микроминиатюризации технических устройств, появление так называемых микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС) привело к появлению и развитию микро- и нанотрибологии [1].

В связи с малыми геометрическими размерами деталей и малыми действующими в микро- и наносистемах силами существенную роль в процессах контактного взаимодействия, и трения в частности, играют поверхностные явления и факторы, которыми в макромасштабах обычно пренебрегают. К ним относятся адгезионное и электростатическое взаимодействия контактирующих поверхностей, их субшероховатость (наношероховатость), капиллярные явления, вязкость и поверхностное натяжение межконтактной среды.

Исследование процессов трения, изнашивания и смазки на микро- и наномасштабных уровнях способствует более глубокому пониманию фундаментальных аспектов работы триботехнических макросистем.

Трение (в микро- и наномасштабах особенно) относится к поверхностным явлениям, когда процесс контактного взаимодействия происходит в тонких поверхностных слоях толщиной в несколько характерных молекулярных или атомных размеров. Строение и свойства этих тонких поверхностных слоев определяют триботехнические характеристики пар трения.

Цель работы — изучение влияния тонких пленок жирных кислот с различной длиной молекул на коэффициент трения и параметры удельной силы трения (критическое напряжение сдвига дискретного металлического контакта).

Жирные кислоты относятся к поверхностно-активным веществам, которые входят в виде присадок в смазочные материалы. Образуя за счет физической адсорбции на поверхностях трения тонкие пленки толщиной порядка 1...10 нм, они способствуют существенному снижению коэффициента трения и интенсивности изнашивания.

Образцы и методика эксперимента

Эксперименты по определению коэффициента трения и удельной силы трения в контакте стальных поверхностей с пленками жирных кислот проводили на микротрибометре [2]. Определяли максимальный коэффициент трения покоя по схеме шар—плоскость в диапазоне нормальных нагрузок 0,5...5 мН. Диаметр пятна контакта составил порядка 1...3 мкм, что соответствует по порядку величины среднему диаметру единичного пятна контакта шероховатых поверхностей. Условия эксперимента соответствовали условиям функционирования МЭМС [1].

В качестве плоских образцов использовали концевые меры длины (плитки Иогансона). Образцы изготовлены из хромистой стали с твердостью

sb1016.indd 12 12.10.2016 10:34:14

не менее 800 HV. Шаровой образец диаметром 1 мм изготовлен из стали ШХ15 с твердостью не менее 750 HV. Поверхность образцов имеет шероховатость, соответствующую 13—14-м классам.

Для исследования влияния числа адсорбированных молекул на коэффициент трения использовали растворы различной концентрации капроновой и рицинолевой кислот в толуоле или бензоле.

Капроновая кислота — самая низкомолекулярная из высших жирных кислот, имеет классическую конфигурацию молекулы в виде относительно короткой линейной углеродной цепочки с карбоксильной группой на конце.

Рицинолевая кислота содержит кроме карбоксильной группы гидроксильную и имеет одну двойную связь примерно в середине молекулы. Молекулы рицинолевой кислоты обладают высоким сродством к металлическим поверхностям.

Для исследования влияния тонких пленок жирных кислот с различной длиной молекул на коэффициент трения использовали растворы капроновой, лауриновой, стеариновой и олеиновой кислот в бензоле одной концентрации $C = 1{,}3 \cdot 10^{-4}$.

Длину молекул δ, нм, исследованных кислот оценивали по ее зависимости от числа атомов углерода n_c в цепи: $\delta \approx 0{,}13 n_c$ [3]. Рассчитанные значения δ по сравнению с величинами из других литературных источников [4], приведены в табл. 1.

Капроновая, лауриновая и стеариновая кислоты относятся к насыщенным и имеют линейную молекулу, олеиновая кислота относится к мононенасыщенным и имеет двойную связь примерно в середине молекулы. Форма молекулы V-образная, изгиб с углом примерно 120° при вершине находится в месте расположения двойной связи, поэтому под длиной молекулы в табл. 1 понимается кратчайшее расстояние между карбоксильной группой COOH на одном конце и метильной группой CH_3 на другом конце молекулы.

Поверхности контактирующих тел перед экспериментом промывали полярным и неполярным растворителями, очищали активированным углем по методу А.С. Ахматова, затем выдерживали в вакууме при 140 °С в течение 1 ч, обеспечивая воспроизведение исходного состояния поверхности перед нанесением тонких пленок жирных кислот.

Тонкую пленку жирной кислоты наносили на поверхность стального полированного образца методом сливания растворов. В результате стекания раствора и испарения легколетучего растворителя (бензола или толуола) на поверхности пластинки оставался тонкий слой кислоты.

Таблица 1

Свойства жирных кислот

Кислота	Число атомов углерода в молекуле	Относительная молекулярная масса M	Ориентировочная длина молекулы, нм	
			Расчетная	По литературным данным
Капроновая	6	116	0,78	0,7...1,0
Лауриновая	12	200	1,56	1,5...1,8
Олеиновая	18	282	2,00	1,80
Стеариновая	18	284	2,34	2,3...2,46

Для сравнения проводили эксперименты в режиме сухого трения (без нанесения на поверхность образца пленки кислоты).

Коэффициент трения в зависимости от нагрузки на контакт и концентрации кислоты в растворе

Сравнение зависимостей коэффициента трения f от нагрузки N для двух исследованных кислот одинаковой концентрации представлено на рис. 1.

Граничные слои обеих кислот при малой концентрации уменьшают коэффициент трения по сравнению с очищенной поверхностью. Влияние конфигурации и длины молекулярной цепочки явно не выражено. С увеличением концентрации кислоты в растворе наблюдали повышение зна-

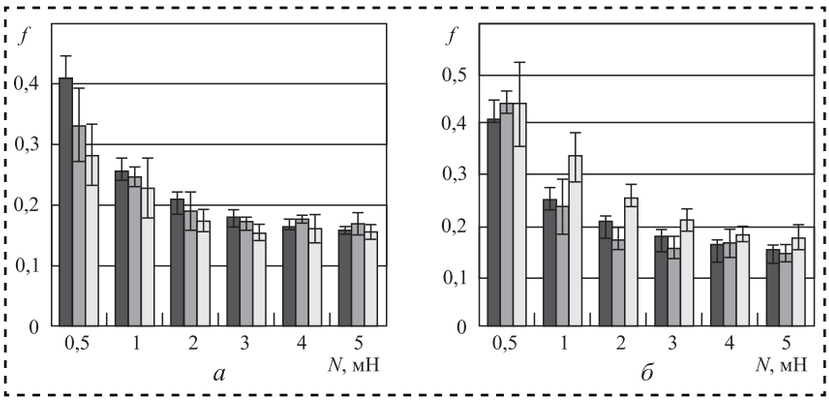


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от нагрузки:
а — $C = 1{,}3 \cdot 10^{-4}$; *б* — $C = 10 \cdot 10^{-4}$; ■ — без кислоты; ■ — капроновая; □ — рицинолевая кислота. Растворитель — бензол

sb1016.indd 13 12.10.2016 10:34:14

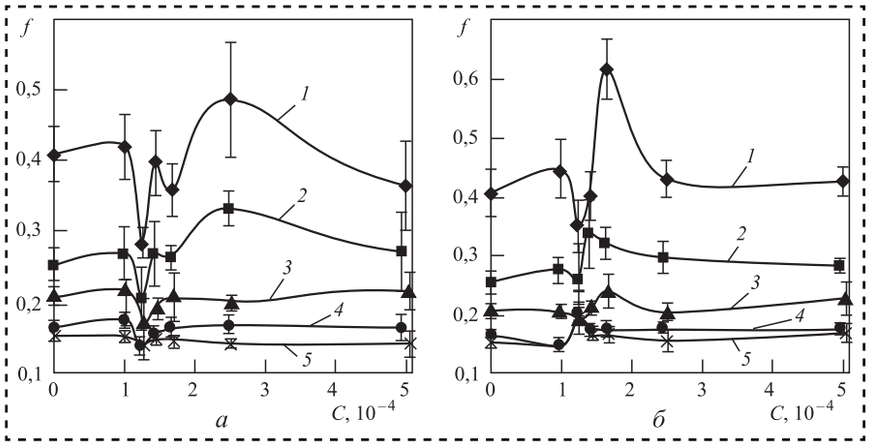


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от концентрации кислот в толуоле при различных нагрузках на контакт:
а — капроновая; *б* — рицинолевая кислота; *1* — 0,5 мН; *2* — 1 мН; 3 — 2 мН; *4* — 5 мН; *5* — 5 мН

чений коэффициента трения. Особенно это выражено для рицинолевой кислоты.

С ростом нагрузки коэффициент трения исследованных кислот убывает, практически стабилизируясь на уровне 0,15...0,20 при нагрузках более 3 мН.

Зависимость коэффициента трения от концентрации жирных кислот в растворителе представлена на рис. 2. Эта зависимость немонотонная, причем немонотонность особенно заметна при малых нагрузках на индентор.

Присутствие на поверхности металла адсорбированных молекул жирных кислот может не только снижать коэффициент трения по сравнению с очищенной поверхностью, но и повышать его. Этот эффект особенно заметен при малых нагрузках на индентор, и более выражен для молекул рицинолевой кислоты, чем для молекул капроновой. Аналогичный эффект наблюдали при трении стекла по стеклу при наличии на поверхности адсорбированных молекул пальмитиновой кислоты, причем примерно при тех же значениях концентрации [Дерягин Б.В. Что такое трение. М.: Изд-во Академии наук, 1963].

При очень малых концентрациях кислоты в растворе получали очень малую степень заполнения адсорбционного слоя, молекулы не образуют сплошной пленки и могут перемещаться по поверхности металла подобно двумерному газу. Кроме молекул кислоты на поверхности металла адсорбируются молекулы растворителя, но они не обладают эффективным экранирующим действием, поэтому коэффициент трения практически не отличается от значений для очищенных поверхностей. С ростом концентрации кислоты в растворе степень заполнения адсорбированного слоя увеличивается, молекулы кислоты при этом располагаются параллельно поверхности адсорбента, снижая коэффициент трения по сравнению со значениями для очищенных поверхностей. При дальнейшем увеличении концентрации кислоты часть ее молекул вынуждена располагаться перпендикулярно поверхности, адсорбированный слой как бы становится шероховатым, и коэффициент трения увеличивается. При достаточно больших концентрациях кислоты заполнение адсорбированного слоя становится полным, все молекулы располагаются перпендикулярно поверхности и адсорбированный слой приобретает характерный вид "щетки". Коэффициент трения снижается и перестает зависеть от концентрации кислоты.

При очень малых нагрузках коэффициент трения медных поверхностей, смазанных лауриновой и монтановой (октакозановой) кислотами, выше, чем несмазанных поверхностей [Трение и граничная смазка: сборник статей / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953]. При малых нагрузках трение обусловлено не взаимодействием твердых поверхностей, а процессами в самой углеводородной пленке. С ростом нагрузки через смазочную пленку во взаимодействие вступают неровности поверхностей.

Коэффициент трения в зависимости от нагрузки на контакт и длины молекулы кислот

Экспериментальные значения коэффициента трения покоя f в исследованном контакте при различных нагрузках на шаровой образец и в зависимости от длины молекулы кислот представлены на рис. 3.

В контакте стальных поверхностей без пленок смазочного материала зависимость $f(N)$ убывающая во всем исследованном диапазоне нагрузок (рис. 3, *а*). В присутствии поверхностных пленок коэффициент трения сначала убывает с ростом нормальной нагрузки, затем остается практически постоянным.

Коэффициенты трения в экспериментах при относительно больших нагрузках $f \approx 0{,}1$, при малых нагрузках $f \approx 0{,}15...0{,}25$. В опытах Ф.П. Боудена и Д. Тейбора со стальной парой трения и жирными кислотами в качестве смазки при молеку-

sb1016.indd 14 12.10.2016 10:34:15

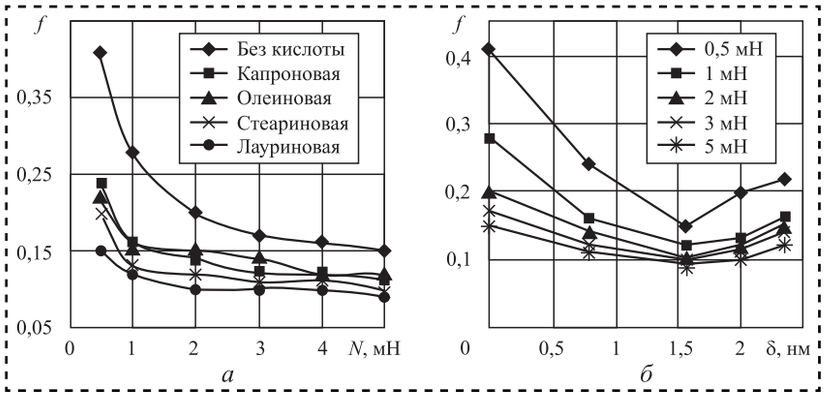


Рис. 3. Коэффициент трения исследованных кислот в зависимости от нагрузки (*а*) и длины молекулы (*б*)

лярной массе кислот $M > 100$ коэффициент трения постоянный ($f \approx 0{,}1$).

С представленными на рис. 3, *а* результатами согласуются зависимости коэффициента трения от нагрузки для контакта поверхностей, покрытых монослоями Ленгмюра—Блоджетт, в том числе стеариновой и лауриновой кислот [Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества: Свойства и применение. Л.: Химия, 1981]. Значения коэффициентов трения для пленок этих кислот отличаются незначительно, но в контакте с пленкой стеариновой кислоты коэффициент трения несколько выше, чем в контакте с пленкой лауриновой кислоты.

Зависимость коэффициента трения от длины молекулы кислоты приведена на рис. 3, *б*. Точки, соответствующие нулевой длине, относятся к трению без смазочного материала. Получено немонотонное снижение коэффициента трения в зависимости от молекулярной массы (она может рассматриваться как мера длины молекулы). В исследованиях В. Гарди эта зависимость монотонная, но молекулярные массы кислот ограничены значением $M = 200$ (лауриновая кислота), исследовано трение стеклянного сферического образца по плоской стеклянной пластине.

Удельная сила трения и ее параметры

Коэффициент трения, определяемый как отношение силы трения T к нормальной силе N в контакте трущихся тел ($f = T/N$), широко используется для характеристики пар трения. Более информативной и физически более обоснованной характеристикой пары трения является удельная сила трения τ — аналог критического напряжения сдвига в механике деформируемого твердого тела. На основании измеренных значений коэффициента трения рассчитали удельную силу трения τ в зависимости от нормального контактного напряжения σ_n (или от фактического контактного давления p_r). Поскольку измеряли максимальный коэффициент трения покоя, величину τ можно интерпретировать именно как критическое напряжение сдвига исследуемого контакта и сопоставлять его с критическим напряжением сдвига материалов контактирующих тел.

Значения удельной силы трения при наличии на поверхности контакта пленок жирных кислот в зависимости от фактического контактного давления приведены на рис. 4. Фактическое контактное давление рассчитывали на основании формулы Герца для радиуса контакта упругих тел с первоначальным касанием в точке:

$$p_r = \frac{N}{\pi a_\Gamma^2} = \frac{N}{\pi\left(\frac{3}{4}\frac{NR}{E^*}\right)^{2/3}},$$

где N — нагрузка на шаровой образец;

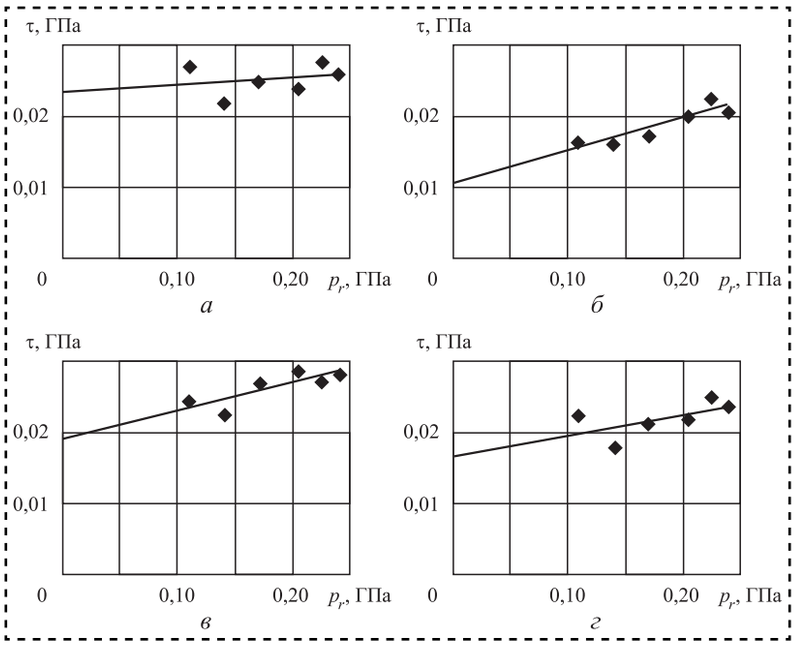


Рис. 4. Зависимость удельной силы трения от фактического контактного давления при наличии на поверхности трения пленки жирной кислоты: *а* — капроновая; *б* — лауриновая; *в* — олеиновая; *г* — стеариновая. Линии — аппроксимация вида $\tau = \tau_0 + \beta p_r$

sb1016.indd 15 12.10.2016 10:34:15

Таблица 2

Значения параметров удельной силы трения при наличии пленок жирных кислот на поверхности контакта

Параметр	Кислота			
	Капроновая	Лауриновая	Олеиновая	Стеариновая
τ_0, МПа	24	11	19	17
β	0,010	0,046	0,040	0,030

$a_Г$ — герцевский радиус контакта;

R — радиус шарового образца;

E^* — эквивалентный модуль Юнга материалов контактирующих тел.

На основании экспериментально определенной зависимости $\tau(p_r)$ (см. рис. 4) с помощью линейной аппроксимации $\tau = \tau_0 + \beta p_r$ определяли параметры удельной силы трения τ_0 и β по И.В. Крагельскому (табл. 2).

Относительно длинные молекулы высших жирных кислот практически полностью экранируют металлические связи в контакте, и адгезионное взаимодействие происходит между концевыми метильными группами CH_3 молекул в соседних слоях. Границы соседних слоев выступают в качестве плоскостей легкого скольжения, по которым происходит сдвиг при приложении к контакту касательной силы. Теоретически удельную силу трения как критическое напряжение сдвига контакта обычно оценивают по формуле

$$\tau = \gamma/d,$$

где γ — поверхностная энергия;

d — характерный атомный размер в направлении сдвига (период кристаллической решетки или диаметр атома) [5].

Приняв оценочные значения $\gamma \approx 5...10$ мДж/м^2, $d \approx 0{,}45$ нм, получим $\tau \approx \gamma/d \approx 11...22$ МПа, что хорошо согласуется с результатами экспериментов (см. табл. 2).

В экспериментах с пленкой капроновой кислоты получены повышенные значения τ_0 по сравнению с пленками остальных кислот и пониженное значение параметра β. Из-за малой толщины поверхностного слоя в данном случае еще проявляется взаимодействие металлических поверхностей, хотя и сильно ослабленное.

Заключение

Наличие тонких пленок поверхностно-активных веществ (жирных кислот) на поверхности контактирующих металлических образцов может приводить как к снижению, так и к увеличению коэффициента трения по сравнению с очищенной поверхностью. На значение коэффициента трения оказывает влияние степень заполнения адсорбированного слоя на поверхности металла.

Наименьшие значения коэффициента трения стальных поверхностей с поверхностными пленками жирных кислот в ряду $n_C = 6...18$ (n_C — число атомов углерода в молекуле кислоты) наблюдаются для пленок лауриновой кислоты ($n_C = 12$).

В контакте стальных поверхностей с пленками высших жирных кислот их присутствие на поверхности контакта экранирует взаимодействие контактирующих тел, и влияние адгезионных сил становится несущественным. В этом случае удельная сила трения определяется адгезионным взаимодействием молекул жирных кислот, адсорбированных на поверхности контактирующих тел.

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. **Пат. 2150688 РФ.** Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала / В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, И.Н. Нестерова, А.А. Иванова; опубл. 10.06.2000. Бюл. № 16.

3. **Гельфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.П.** Коллоидная химия СПб.: Лань, 2004. 236 с.

4. **Новый** справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Ч. 2. СПб.: Мир и Семья, 2002. 1142 с.

5. **Дедков Г.В.** Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // Успехи физических наук. 2000 (170). № 6. С. 585—618.

sb1016.indd 16 12.10.2016 10:34:15

УДК 669.131

Д.А. Болдырев, *д-р техн. наук,* **Л.И. Попова,** *канд. физ.-мат. наук*
(Тольяттинский государственный университет),
Н.Н. Сафронов, *д-р техн. наук*
(Набережночелнинский институт (филиал) Казанского федерального университета)
E-mail: DA.Boldyrev@vaz.ru

О некоторых проблемах материаловедения в трибологии

Сформулированы и кратко проанализированы основные направления материаловедения в трибологии и вытекающие из них актуальные направления повышения долговечности деталей машин и механизмов, на основании которых выведены материаловедческие проблемы в трибологии.

Formulated and briefly analyzed the main directions in materials science in tribology and the resulting topical directions of improving durability of machine parts and mechanisms under which bred basic materials science problems in a tribology and their review was conducted.

Ключевые слова: материаловедение, трибология, надежность, долговечность, трещиностойкость, изнашивание, трибосистема.

Keywords: materials science, tribology, reliability, durability, crack resistance, wear, tribosystem.

Современному машиностроению требуются детали, имеющие низкую металлоемкость, высокие надежность и долговечность. Металлоемкость определяется прочностными характеристиками сплава, его сопротивлением пластической деформации. Чем выше указанные параметры материала, тем ниже металлоемкость детали. Надежность детали в первую очередь зависит от трещиностойкости. Данный параметр напрямую влияет на работоспособность детали, так как ее разрушение происходит из-за появления трещин в материале и характера их роста. В случае если трещиностойкость материала детали достаточно высока, долговечность деталей часто ограничивается низкой износостойкостью поверхности.

Трибология — наука, изучающая долговечность деталей машин и механизмов в зависимости от несущей силовой и скоростной способности узла, коэффициента трения контактирующей пары деталей, определяемого видом смазки и условиями внешней среды и теплопередачи. В трибологии комплексный подход к изучению конструкционных и материаловедческих характеристик деталей узлов машин и механизмов. Часто трибология сталкивается с проблемой невозможности экономичного конструирования узла или машины ввиду отсутствия материалов с требуемыми свойствами [1]. В первую очередь это касается космической техники, атомной энергетики, медицинского машиностроения. Важнейшая характеристика объекта трибологии — долговечность детали, непосредственно связанная с успехами в материаловедении — дисциплине, сочетающей достижения физики твердого тела, структурной механики разрушения и технологии энергетического воздействия на материалы.

Проблема износостойкости материалов для народного хозяйства имеет не только технический, но и экономический аспект, так как имеют место колоссальные затраты, связанные с преждевременным износом оборудования, инструмента, низким КПД агрегатов.

Перспективные направления в решении проблем изнашивания реальных деталей машин и конструкций:

1. Подход к процессу взаимодействия двух шероховатых тел с позиций континуальной механики, согласно которой изнашивание представляется как усталостный процесс разрушения в результате многократного взаимодействия микронеровностей [2].

2. Макроскопическая модель изнашивания, предполагающая построение специальной функции, характеризующей меру повреждения материала и зависящей от амплитудных

sb1016.indd 17 12.10.2016 10:34:15

значений напряжений в данной точке, ее координаты и времени [3]. Специфика рассматриваемой концепции разрушения поверхности заключается в том, что после акта разрушения оставшаяся часть материала вступает в контакт, имея в себе следы истории процесса, т.е. поврежденность.

3. Динамическая модель, в рамках которой трущийся материал представляется в виде системы возбужденных осцилляторов, затухающих в соответствии с релаксационными свойствами материала [4]. При этом возможна диссипация энергии посредством волновых потоков, что является одним из проявлений структурной самоорганизации системы трения.

4. Представление о механизмах взаимодействия поверхностей пары трения, учитывающее комплекс механических и физико-химических процессов в зоне контакта. В этот комплекс входит тепловыделение, изменение структуры сплавов (фазовая и дефектная эволюция), синтезирование новых веществ, возникновение и эволюция различных полей (напряжений, деформаций, температур, электричества). В этих процессах активно участвуют окружающая среда и смазка.

5. Концепция фрикционного течения, описывающая эволюцию поверхностного слоя материала при трении — многостадийный процесс, включающий пластический сдвиг, разрыхление поверхностного слоя материала и его ротацию [5—7].

6. Концепция структурной фрагментации — образование частиц износа происходит за счет механизма трения, основанного на дислокационно-дисклинационной структуре поверхностных слоев металлов [8]. По мере увеличения расстояния от поверхности возрастает размер фрагментов и происходит уменьшение степени их дезориентировки. Взаимосвязь фрагментации и разрушения металла в процессе трения создает предпосылки для обоснованного выбора материалов трущихся пар и управления их совместимостью путем создания оптимальных структур поверхностных слоев в различных условиях фрикционного нагружения.

7. Теория структурно-энергетической приспосабливаемости материалов при трении — все процессы трения и поверхностного разрушения возникают и развиваются в результате двух основополагающих и противоположно направленных явлений: активирования — увеличения свободной поверхности материалов системы трения и пассивации — ее уменьшения [9—12].

8. Информационно- и структурно-динамическая концепции трибосистемы — трение между материалами рассматривается как стохатизация системы линейных осцилляторов — элементарных возбуждениий [13, 14]. При этом имеющие место синергетические эффекты (автосинхронизация, автоволны параметров) обусловлены потоковой корреляцией этих возбуждений.

Каждое из этих направлений позволяет эффективно решать задачи по увеличению износостойкости материалов, но в определенно заданных условиях эксплуатации машиностроительного изделия.

Анализ современных тенденций развития исследований по достижению наибольшей долговечности деталей машин как объекта трибологии позволяет выделить приоритетные актуальные прикладные направления.

1. Анализ возможных моделей процесса изнашивания, дающий возможность познать феномен отделения частицы износа от материала детали и, как следствие, разработать мероприятия, позволяющие успешно бороться с поверхностным разрушением.

2. Прогнозирование износостойкости материалов по стандартным характеристикам механических свойств, критериям вязкости разрушения.

3. Исследование эволюции структуры приповерхностных объемов трущихся материалов. Изучение структурных аспектов разрушения поверхности материала при изнашивании позволит выяснить причины и величину сил отделения частиц износа и разработать мероприятия по повышению износостойкости материала.

4. Исследования методов воздействия на поверхностные слои трущихся материалов, позволяющих разработать эффективные способы защиты деталей машин от изнашивания путем диффузионного насыщения поверхности различными элементами, нанесением износостойких покрытий, высокоэнергетическим воздействием.

Эти прикладные направления исследований составят основу для разработки новых сплавов и методов создания оптимальных структур поверхностей трущихся материалов при вещественном и энергетическом воздействиях.

Если рассматривать конкретную ситуацию в отношении детали, подвергающейся изнашиванию, то проблема превращается в многофакторную:

— внешние факторы — среда, смазка, температурный режим работы и другие внешние условия;

sb1016.indd 18 12.10.2016 10:34:15

— механические факторы, определяющие вид изнашивания на основании параметров и условий взаимодействия тел – трение скольжения, абразивный износ, эрозия, контактная усталость, фреттинг-коррозия и др.;

— структурные факторы, определяемые видом материала, его химическим составом, дислокационной и зеренной структурой и зависящими от них свойствами (прочность, трещиностойкость).

Совокупность факторов и определяет искомую величину износостойкости. Каждая группа факторов имеет свое самостоятельное значение. Если исходить из возможности изменения факторов с целью влияния на износостойкость, то очевидно, что группа структурных факторов (материаловедческая) играет решающую роль в резерве повышения искомой величины.

Наиболее значимыми видами изнашивания, на долю которых приходятся основные материальные потери, связанные с преждевременным износом оборудования, являются абразивное изнашивание и изнашивание от трения скольжения. В этой связи можно выделить материаловедческие направления исследования, позволяющие эффективно решать проблемы трибологии:

— структурная теория износостойкости сплавов;

— оптимальные структуры сплавов с высокой износостойкостью;

— износостойкие сплавы с гетерофазными структурами;

— высокоэнергетические воздействия на поверхность деталей машин;

— комбинированное (объемное и поверхностное) упрочнение и нанесение покрытий;

— новые методы исследования триботехнических материалов.

Первые четыре направления исследований носят фундаментальный характер, так как они направлены на выяснение физико-механических аспектов микромеханизмов износа поверхности, изучение термодинамических закономерностей структурных изменений в поверхностных слоях пары трения, оптимизации субструктур простых металлов и сложных сплавов на предмет определения перспективных направлений в повышении износостойкости различных материалов. Два последних направления имеют поисково-прикладной характер, так как в рамках этих исследований создается база для разработки новых, прогрессивных, высоких технологий упрочнения деталей машин, обладающих высокой износостойкостью.

Библиографический список

1. **Jost H.P.** Whither trjbology. London: Institute of metals. 24 p.
2. **Крагельский И.В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 479 с.
3. **Горячева И.Г., Чекина О.Г.** Модель усталостного разрушения поверхностей трения // Трение и износ. 1990. Т. 11. № 3. С. 389—400.
4. **Крысов С.В., Орлов А.Л.** Вопросы волновой механики трибосистем: тез. докл. / Структурная самоорганизация и оптимизация триботехнических характеристик конструкционных материалов. Киев: Знание, 1990. С. 8—9.
5. **Алексеев Н.М., Мелашенко А.И., Нагорных С.Н.** Динамика фрикционного контакта // Трение и износ. 1989. Т. 10. № 5. С. 809—819.
6. **Словарь-справочник** по трению, износу и смазке деталей машин / В.Д. Зозуля, Е.Л. Шведков, Д.Я. Ровинский, Э.Д. Браун. Киев: Наукова думка, 1990. 264 с.
7. **Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В.** Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 230 с.
8. **Гарбар И.И.** Пространственно-временная эволюция фрагментированных структур при фрикционном нагружении // Теоретическое и экспериментальное исследование дисклинаций: сб. науч. тр. / ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Ленинград: ФТИ, 1986. С. 98—107.
9. **Костецкий Б.И.** Структурно-энергетическая приспосабливаемость материалов при трении // Трение и износ. 1985. Т. 6. № 2. С. 201—212.
10. **Пинчук Р.Г., Пинчук В.Г., Харитонов В.В.** Взаимосвязь кинетики изнашивания со структурными изменениями на фрикционном контакте // Трение и износ. 1984. Т. 5. № 4. С. 670—676.
11. **Гарбар И.И.** Фрагментация поверхностных слоев низкоуглеродистой стали и меди при усталостном и адгезионном изнашивании // Трение и износ. 1986. Т. 7. № 6. С. 1043—1053.
12. **Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.** Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 212 с.
13. **Бершадский Л.И.** О развитии оснований трибологии // Структурная самоорганизация и оптимизация триботехнических характеристик конструкционных материалов: тез. докл. Киев: Знание, 1990. С. 2—3.
14. **Бершадский Л.И.** Структурная самоорганизация трибосистем и возможности конструирования износостойких материалов // Структура и конструктивная прочность стали. Новосибирск: НЭТИ, 1989. С. 96—103.

sb1016.indd 19 12.10.2016 10:34:15

УДК 621.891

С.Т. Юнусходжаев, *канд. техн. наук*
(Ташкентский государственный технический университет)
E-mail: said starshiy1954@tashgtu.ru

Износостойкость подшипников скольжения, работающих в среде переменного нагружения

Дана теоретическая оценка износа подшипников скольжения, работающих в среде переменного нагружения, на примере подшипников скольжения планетарного механизма поворота гусеничных тракторов. Полученные аналитические зависимости позволяют рассчитать износ подшипника и вала, а также изменение зазора между ними. Сравнивая полученную величину с предельным зазором, можно определить срок службы подшипников скольжения.

The article is devoted to theoretical assessment wear slide bearings operating in an environment variable loading, an example of slide bearings of the planetary rotation mechanism of crawler tractors. The analytical dependences allow to calculate the wear of the bearing and the shaft, as well as the change of the gap. By comparing the obtained value with the limit gap, it is possible to determine the service life of the slide bearings.

Ключевые слова: планетарный механизм поворота, износ подшипника, износ вала, абразивный износ, окислительный износ, усталостный износ.

Keywords: planetary rotation mechanism, the wear of the bearing, shaft wear, abrasive wear, oxidation wear, fatigue wear.

Износ деталей подшипников скольжения планетарного механизма поворота может быть причиной перекоса солнечной шестерни и ускорения износа остальных деталей заднего моста, торцевых поверхностей и зубьев шестерен, наружных, внутренних торцевых и стыковых поверхностей втулок, цапф солнечной шестерни, резиновых манжет и уплотнений, т.е. всех трущихся поверхностей. Из-за увеличения зазора и перекоса солнечной шестерни возможно проворачивание втулок.

Цель работы — изучение возможности оценки износа подшипников скольжения, работающих в среде переменного нагружения, с учетом абразивного, окислительного и усталостного износа.

Критериями работоспособности опор скольжения являются допускаемая температура в рабочей зоне подшипника, минимальная толщина смазочной пленки, зазор между валом и втулкой (износ втулок больше допустимого значения приводит к перекосу вала, и, следовательно, к нарушению режима работы узла). Температура рабочих поверхностей опор скольжения устанавливается с помощью термопары.

Для определения количества смазочного материала, поступающего на поверхность трения рассчитывали толщину минимального смазочного слоя для подшипников скольжения планетарного механизма поворота (ПМП) гусеничных тракторов по формуле

$$h_{кр} = h_ш + h_в + h_п + h_д + h_и,$$

где $h_ш$ и $h_в$ — высота микронеровностей поверхностей шипа и подшипника, мкм;

$h_п$, $h_д$ и $h_и$ — перекос прогиба упругой линии вала по длине подшипника, отклонение от профиля продольного сечения шипа и вкладыша (бочкообразность, седлообразность, конусность), мкм.

Подшипник, работающий в режиме граничной смазки, устойчив при соблюдении условия $h_{min} \geqslant h_{кр} + 2$ мм.

Для оценки работоспособности подшипников скольжения необходимо установить предельно допустимый зазор между парами трения.

Предельный износ подшипников скольжения ПМП обусловливает нарушение нормальной эксплуатации машин, появление неравномерной нагрузки на все детали ПМП, деформацию конструкции, которая ведет к тяжелым последствиям отказа, хотя эффективность работы машины может быть при этом достаточно высокой.

В настоящее время нормативы на предельные величины износа для подшипников скольжения

sb1016.indd 20 12.10.2016 10:34:15

ПМП отсутствуют. На практике при каждом ремонте машин приходится определять, могут ли изношенные детали продолжать выполнять свои функции или их надо заменять. Поэтому весьма актуальной является задача обоснования и установления предельного износа подшипников скольжения ПМП.

Предельный перекос при зацеплении в прямозубых передачах, который используется для расчета предельной величины перекоса зубьев солнечной шестерни в зацеплении с зубьями сателлита:

$$\delta_{пр} = \frac{12\,138ML}{\pi CB^2 d_а \cos\alpha_{оп}},$$

где M — крутящий момент, передаваемый солнечной шестерней, Н·мм;

L — расстояние между опорами, м;

B — ширина зубчатого венца, м;

C — удельная жесткость материала зубьев;

$d_а$ — диаметр окружности зубчатого кольца, м;

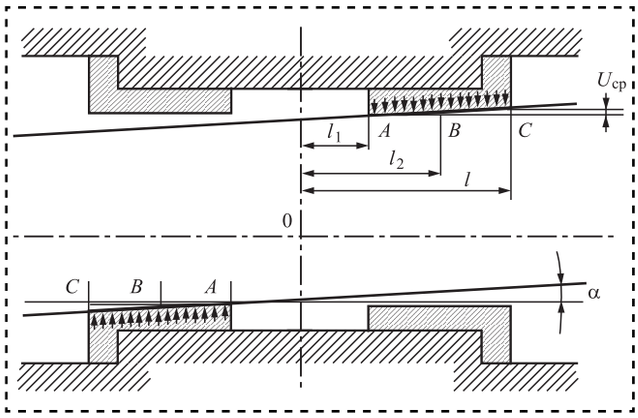
$\alpha_{оп}$ — профильный угол производящей рейки в нормальном сечении, °.

Зная предельный перекос солнечной шестерни в зацеплении с зубьями сателлита, находим предельный зазор подшипников скольжения ПМП с учетом угла перекоса α (рисунок):

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\delta_{пр}}{l_3 + \frac{l_2}{2}} = \frac{U_{пр} + \Delta}{l}.$$

Зазор между подшипником скольжения и солнечной шестерней не должен превышать

$$U + \Delta \geqslant \operatorname{tg}\alpha \frac{l_2}{2} = \frac{\delta_{пр} l_2}{2l}.$$



Вероятность перекоса солнечной шестерни:

α — угол перекоса; $U_{ср}$ — средний износ втулки; l, l_1, l_2 — расстояния от центра перекоса; *A, B, C* — точки опор подшипника

Составлена методика расчета износостойкости деталей подшипников скольжения ПМП гусеничных тракторов.

Работа деталей машин в условиях запыленной окружающей среды — причина наличия в смазке частиц пыли. Эти абразивные частицы в процессе эксплуатации машин попадают в зазор сопряжения, вызывая абразивное изнашивание. Нагрузка, действующая на поверхность трения, передается через абразивные частицы, если размеры этих частиц соизмеримы с зазором и взаимодействуют с обеими поверхностями трения. Если силы, действующие на абразивную частицу, достигают критических величин, превышающих предел ее прочности, то частица начинает дробиться (измельчаться). В случае дробления абразивных частиц до размеров меньших значения зазора и толщины масляной пленки они теряют свою активность и нагрузка в паре трения передается через масляную пленку с равномерным распределением по номинальной площади контакта. Тогда в паре трения преобладает окислительное изнашивание.

Вероятность разрушения поверхностей абразивным ($\beta_а$) и окислительным ($\beta_о$) изнашиванием зависит от поступления и наличия на поверхности трения смазочного материала, так как основным транспортирующим средством абразивных частиц является масло. Тогда

$$\beta_о + \beta_а = q_ф/q_н, \qquad (1)$$

где $q_ф$ — обьем масла, фактически поступающего на поверхность трения, мм^3;

$q_н$ — расчетный объем масла, нормально (максимально) поступающего на поверхность трения, мм^3.

Вероятность абразивного изнашивания зависит от времени активности частиц $t_а$:

$$\beta_а = \frac{t_а}{T}, \qquad (2)$$

где T — время работы узла или агрегата, ч.

Время активности абразивных частиц [5]

$$t_а = \frac{\ln\varepsilon}{\omega \ln(1 - A)}, \qquad (3)$$

где ε — концентрация абразивных частиц в масле, %;

ω — угловая скорость, с$^{-1}$;

$$A = \frac{n\pi r l d_а}{q_ф}, \qquad (4)$$

где n — частота вращения, с$^{-1}$;

r — радиус вала, мм;

l — длина подшипника, мм;

$d_а$ — диаметр абразива, мм.

sb1016.indd 21 12.10.2016 10:34:15

Тогда из формул (2), (3) и (4)

$$\beta_а = \frac{\ln \varepsilon}{T\omega \ln\left(1 - \frac{n\pi l d_а}{q_ф}\right)}. \quad (5)$$

Объем нормального поступления масла на поверхность трения [5]:

$$q_н = 0{,}5\omega l d^2 q \psi; \quad (6)$$

где q — коэффициент истечения смазки;

ψ — относительный зазор сопряжения, мм;

$$\psi = \left\{\frac{\omega d \mu l [S_о]}{N}\right\}^{1/2}, \quad (7)$$

где μ — динамическая вязкость масла, П;

$[S_о]$ — критическое значение Зоммерфельда [3].

Принимая во внимание выражения для (5), (6), (7) из (1), имеем

$$\beta_о = \frac{T q_{ср} \ln\left(1 - \frac{n\pi r l d_а}{q_ф}\right) - 0{,}5 \ln \varepsilon l d^2 q \left[\frac{\omega d \mu l [S_о]}{N}\right]^{1/2}}{0{,}5 T \omega l d^2 q \left[\frac{\omega d \mu l [S_о]}{N}\right]^{1/2} \ln\left(1 - \frac{n\pi r l d_а}{q_ф}\right)}. \quad (8)$$

В условиях трения без смазки или при граничной смазке проявляется усталостное изнашивание

$$\beta_у + \beta_а + \beta_о = 1. \quad (9)$$

Тогда учитывая (1), имеем

$$\beta_у = 1 - \frac{q_{ср}}{q_н} = 1 - \frac{q_{ср}}{0{,}5\omega d^2 q \left[\frac{\omega d \mu l [S_о]}{N}\right]}. \quad (10)$$

Износ поверхностей трения определяется по выражению

$$U = \beta_у U_у + \beta_а U_а + \beta_о U_о, \quad (11)$$

где $U_у$, $U_а$, $U_о$ — износ поверхностей при усталостном, абразивном и окислительном изнашиваниях соответственно, мм.

Величины различных видов износа определяются с помощью формул И.В. Крагельского [1], Б.М. Костецкого [2] и У.А. Икрамова [4].

Время работы узла

$$T_р = t_у + t_а + t_о, \quad (12)$$

где $t_у$, $t_а$, $t_о$ — время разрушения поверхностей тем или иным видом изнашивания.

Вероятность усталостного $\beta_у$, абразивного $\beta_а$ и окислительного $\beta_о$ изнашивания:

$$\beta_у = \frac{t_у}{T_р}; \ \beta_а = \frac{t_а}{T_р}; \ \beta_о = \frac{t_о}{T_р}. \quad (13)$$

Продолжительность абразивного и окислительного изнашивания поверхностей зависит от чистоты поступающего в зазор пары трения масла. Возможен случай, когда в зазор подшипников скольжения вместе с маслом проникают абразивные частицы и до дробления или внедрения в одну из поверхностей проявляют свою активность в процессе изнашивания. В этом случае время активности абразивных частиц:

$$t_а = \ln \varepsilon / \omega \ln\left(1 - \frac{\pi r l d_а}{V_ф}\right), \quad (14)$$

где $V_ф = \frac{q_ф}{n}$ — объем масла, расходуемый за один цикл, мм^3;

$q_ф$ — фактический объем смазки на поверхности трения, мм^3/ч;

n — число циклов нагружения.

Тогда

$$\beta_а = \frac{\ln \varepsilon}{T_р \omega \ln\left(1 - \frac{n\pi r l d_а}{q_ф}\right)}.$$

Имея в виду $\beta_у + \beta_а + \beta_о = 1$ и учитывая выражения (13) и (14), получим

$$\beta_у = 1 - \frac{q_ф}{q_н} = \frac{0{,}5\omega l d^2 q \left[\frac{\omega d \mu l [S_о]}{N}\right]^{1/2} - q_ф}{0{,}5\omega l d^2 q \left[\frac{\omega d \mu l [S_о]}{N}\right]^{1/2}}.$$

По результатам расчетных значений определены износ вала и подшипника скольжения ПМП, а также изменение зазора между ними. Сравнивая полученную величину с предельным зазором, можно определить срок службы подшипников скольжения.

Библиографический список

1. **Крагельский И.В., Михин Н.М.** Узлы трения машин. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
2. **Поверхностная** прочность материалов при трении / под ред. Б.И. Костецкого. Киев: Техника, 1976. 292 с.
3. **Детали** машин. Т. 1 / под ред. Н.С. Ачеркана М.: Машиностроение, 1968. 440 с.
4. **Повышение** долговечности цилиндрических деталей с непараллельными осями / У.А. Икрамов и др. Ташкент: Фан, 1975. 82 с.
5. **Махкамов К.Х.** Расчет износостойкости машин: учеб. пособие. Ташкент: ТашГТУ, 2002. 144 с.

sb1016.indd 22 12.10.2016 10:34:16

УДК 621.89.093

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

Оценка износа деталей агрегатов машин по содержанию продуктов износа в масле

Дана теоретическая оценка износа и концентрации продуктов износа, выпадающих в масла агрегатов машин из зубчатых передач, подшипников качения и шлицевых соединений. Учтены изменения концентрации продуктов износа при периодической доливке в агрегат свежего масла до необходимого уровня. Полученные аналитические зависимости позволяют рассчитать объем и концентрации продуктов износа в масле в зависимости от геометрических параметров контакта поверхностей в процессе трения рассматриваемых деталей агрегатов машин.

The theoretical estimate of the concentration of wear and wear products that fall in oil units of machinery gears, rolling bearings and splines. Changes in the concentration of wear at periodic refilling unit in fresh oil up to the required level. The analytical function allows to calculate the volume and concentration of wear debris in the oil, depending on the geometric parameters of the contact surfaces during sliding parts aggregates of machines under consideration.

Ключевые слова: изменение концентрации продуктов износа, зубья шестерен, элементы шариковых подшипников, шлицевые соединения.

Keywords: change in the concentration of wear, wear gear tooth wear on the product, wear elements of ball bearings, splines worn.

В практике эксплуатации машин широко используется метод прогнозирования износа деталей агрегатов машин по концентрациям продуктов износа в масле. Данная методика направлена на определение общей концентрации продуктов износа, по которой можно судить о динамике износа всех деталей в агрегате. Способы определения линейного износа, позволяющие оценить распределение продуктов износа по отдельным деталям или их группам в агрегате, отсутствуют.

Цель работы — изучение износа зубчатых колес (по износу зубьев) и подшипников качения (по износу элементов), муфт и валов (по износу шлицев) по концентрациям продуктов износа в масле агрегата с определяением доли продуктов износа, выпадающих в масло из каждой группы деталей.

Материалы и методы исследований. Методами расчета или испытания агрегатов машин определяют износ характерных поверхностей трения рассматриваемых деталей. По значениям износа этих деталей в агрегате строят эпюру, согласно которой рассчитывают объем износа.

В общем виде суммарный объем продуктов износа, выпадающих из деталей в масло агрегата, составляет:

$$V_э = V_ш + V_п + V_м + V_в,$$

где $V_ш$, $V_п$, $V_м$, $V_в$ — объем продуктов износа зубьев шестерен, элементов подшипников качения, зубчатых муфт, валов и соединений с ними ступицы по износу шлицев соответственно.

В работе зубчатых муфт отсутствуют перемещения по высоте и незначительны смещения по длине зубьев, поэтому износ зубьев по их толщине практически отсутствует. Муфты выходят из строя, в основном, в результате объемного смятия торцевых поверхностей, от чего в масло продукты износа практически не выпадают.

Валы в агрегатах со ступицей, как правило, соединены с помощью шлицев. Шлицы вала и ступицы имеют микроперемещения друг относительно друга за счет бокового зазора, приводящие к интенсивному деформированию с последующим окислением поверхностей контакта (фретинг-процесс), выделением с поверхностей контакта шлицев продуктов износа, и выходят из строя, в основном, в результате бокового износа зубьев [1].

Внутреннее кольцо подшипника устанавливается на вал шестерни с натягом, поэтому от этого сопряжения в масла практически не выпадают продукты износа. Таким образом, износостойкость деталей силовых агрегатов машин, имеющих указанные силовые взаимодействия, зависит от концентрации продуктов износа, выпадающих в масло

sb1016.indd 23 12.10.2016 10:34:16

от зубчатых колес, подшипников качения и боковых поверхностей шлицевых соединений [1].

Количество продуктов износа, выпадающих в масло агрегата из отдельных групп деталей, характеризуется коэффициентом, учитывающим долю продуктов износа, приходящейся на каждый тип деталей за один срок замены масла.

Для зубчатых передач, подшипников качения, шлицевых соединений используют формулу

$$k_i = \frac{V_i}{V_э}.$$

Общая масса продуктов износа, находящихся в масле агрегата за один срок замены масла, составляет:

$$G_о = G + G_{ост},$$

где G — масса продуктов износа, выпадающих в масло в результате износа деталей в агрегате за один срок замены масла;

$G_{ост}$ — остаточное количество продуктов износа, осевшее на дно картера агрегата после замены масла.

Результаты исследования и их обсуждение

Изменение концентрации продуктов износа в маслах агрегатов машин при периодической доливке свежего масла. Высокая температура окружающей среды снижает вязкость смазочных материалов, вследствие чего часть масла с продуктами износа стекает из картера через неплотности прилегания уплотнительных элементов в соединениях, что приводит к уменьшению уровня масла в агрегате. Поэтому в процессе эксплуатации в целях обеспечения нормальной смазки деталей в картер агрегатов машин периодически доливают свежее масло, при этом после каждой доливки общая концентрация продуктов износа в масле уменьшается, а степень снижения концентрации зависит от массы доливаемого свежего масла.

Рассмотрим динамику накопления продуктов износа в масле агрегатов в условиях эксплуатации машин. Предположим, что в период работы машины уровень запыленности, температура окружающей среды и герметичность картера агрегатов не меняются, прирост концентрации продуктов износа за период между доливками свежего масла будет постоянным [2]. В этом случае масса продуктов износа, удаленных из картера в результате утечки масла до первой доливки, составляет:

$$m_1 = G_в \Delta U_{из},$$

где $G_в$ — масса масла, вытекшая из картера агрегата между двумя доливками;

$\Delta U_{из}$ — прирост концентрации продуктов износа в масле между двумя доливками.

Остаточная масса продуктов износа в картере агрегата после первой доливки масла:

$$M_1 = M_0 - m_1 = G_м \Delta U_{из} - G_в \Delta U_{из} = G_м \Delta U_{из}\left(1 - \frac{G_в}{G_м}\right),$$

где M_0 — масса продуктов износа до первой доливки в случае отсутствия утечки масла;

$G_м$ — масса масла при первоначальной заправке агрегата по техническим условиям.

Степень герметичности картера агрегата

$$k = \frac{G_в}{G_м}$$

показывает долю утекшего из картера агрегата масла. Тогда получим:

$$M_1 = G_м \Delta U_{из}(1 - k).$$

Масса продуктов износа, удаляемых из картера агрегата в результате утечки масла за время между двумя доливками свежего масла, с учетом остаточной массы продуктов износа в картере агрегата после первой доливки масла:

$$m_2 = G_м \Delta U_{из}\left[(1 - k) + 1\right].$$

Масса продуктов износа в масле агрегата после второй доливки свежего масла с учетом массы продуктов износа, удаляемых из картера агрегата в результате утечки масла в период от первой до второй доливки свежего масла:

$$M_2 = G_м \Delta U_{из}(1 - k)\left[(1 - k) + 1\right].$$

Масса продуктов износа, удаляемых из картера агрегата в результате утечки масла в период n-й доливки свежего масла с учетом массы продуктов износа, удаляемых из картера агрегата в результате утечки масла в период от первой до n-й доливки свежего масла:

$$m_n = G_м \Delta U_{из}(1 - k)^{n-1} + \\ + (1 - k)^{n-2} + \cdots + (1 - k)^2 + \left[(1 - k) + 1\right].$$

Масса продуктов износа в картере агрегата после n-й доливки зависит от количества доливки свежего масла, срока смены масла с учетом массы продуктов износа, удаляемых из картера агрегата в результате утечки масла за период от первой доливки до смены масла:

$$M_n = G_м \Delta U_{из}(1 - k) \times \\ \times \left\{(1 - k)^{n-1} + (1 - k)^{n-2} + \cdots + (1 - k)^2 + \left[(1 - k) + 1\right]\right\}.$$

После упрощения расчетных выражений получим:

$$m_n = G_м \Delta U_{из}\left(1 - (1 - k)^n\right)\frac{1}{k};$$

sb1016.indd 24 12.10.2016 10:34:16

$$M_n = G_м \Delta U_{из} (1-k)\left(1-(1-k)^n\right)\frac{1}{k}.$$

Аналитическая зависимость для расчета концентрации продуктов в картере агрегата с учетом доливки свежего масла в картер агрегата:

$$\varepsilon_{п.и} = \Delta U_{из} (1-k)\left(1-(1-k)^n\right)\frac{1}{k}.$$

Изменение концентрации продуктов износа от продолжительности эксплуатации машин имеет характер, близкий к линейному [3]. Поэтому при периодической доливке масла прирост концентрации продуктов износа в масле описывают выражением:

$$\Delta U_{из} = at,$$

где a — изменение концентрации продуктов износа за единицу времени;

t — периодичность доливки масла в процессе эксплуатации агрегата.

Тогда выражение для расчета концентрации продуктов в картере агрегата имеет вид:

$$\varepsilon_{п.и} = at(1-k)\left(1-(1-k)^n\right)\frac{1}{k}.$$

Концентрация продуктов износа, накапливающихся в картере агрегата, зависит от герметичности картера и периодичности доливки свежего масла. С помощью полученного выражения можно прогнозировать степень загрязнения масла продуктами износа в период эксплуатации машин.

Рассмотрим накопления продуктов износа в масле агрегата в результате износа зубьев шестерен.

Прогнозирование износа зубьев шестерен по накоплению продуктов износа в масле. Предположим, что агрегат машины имеет n пар шестерен, изготовленных из стали, с равным модулем зацепления m и одинаковой длиной зубьев L. Пробу масла агрегата сняли перед заменой масла после остановки машины для проведения очередного технического обслуживания. Если общая концентрация продуктов износа в масле составляет $\varepsilon_{п.и}$, то общая масса продуктов износа, выпадающих в масло агрегата из зубьев шестерен, равна [1]:

$$G_{п.и} = \varepsilon_{п.и} G_м k_ш.$$

Объем продуктов износа:

$$V_{п.и} = \frac{\varepsilon_{п.и} G_м k_ш}{\gamma}, \quad (1)$$

где γ — плотность продуктов износа;

$k_ш$ — коэффициент для зубчатых передач.

Головка зуба ведущей шестерни изнашивается на 8,6 % больше по сравнению с ножкой зуба, а ножка зуба ведомой шестерни изнашивается на 8,8 % больше, чем головка зуба. Это происходит из-за того, что путь скольжения между головкой зуба ведущей и ножкой зуба ведомой шестерен больше, чем пути скольжения между головкой зуба ведомой и ножкой зуба ведущей шестерен [1].

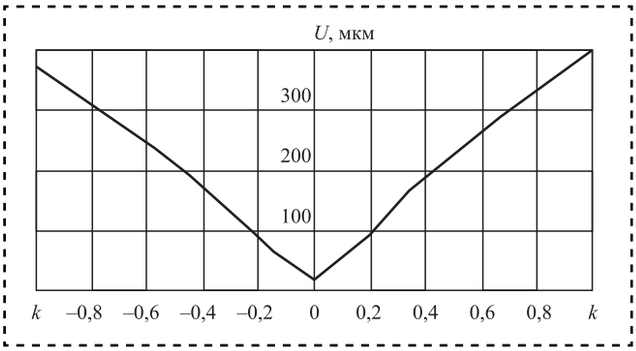


Рис. 1. График изменения линейного износа головки и ножки зубьев шестерен после 1000 ч работы в зависимости от коэффициента высоты зацепления

Пользуясь графиками, приведенными на рис. 1, определим объем продуктов износа, выпадающих в масло агрегата из зубчатых колес, находящихся в агрегате.

Рассчитаем объемный износ одного зуба:

для n-й шестерни:

$$V_{v(n)} = \frac{mL\left(U_{гn} + U_{нn} + 2U_{дn}\right)}{2},$$

где $U_{гn}$, $U_{нn}$, $U_{дn}$ — линейный износ головки, ножки зубьев и начальной зоны делительной окружности n-й шестерни.

Установим коэффициент распределения продуктов износа между отдельными шестернями за срок замены масла в агрегате, для чего определим износ профиля зубьев ведущей и ведомой шестерен в зависимости от коэффициента расположения зацепления относительно делительной окружности ведущей шестерни:

$$k = \frac{h_г}{l_1} = \frac{h_н}{l_1},$$

где $h_г$, $h_н$ — высота головки и ножки зуба относительно начальной окружности ведущей шестерни;

l_1 — длина отрезка по высоте зуба.

Для примера на рис. 1 приведены кривые износа зубьев шестерни дополнительной конечной передачи ТТЗ-100К после 1000 ч работы в зависимости от k. Части кривых $k > 0$ соответствуют износу головки зуба, с $k < 0$ — износу ножки зуба; а с $k = 0$ — износу зоны начальных окружностей. График построен для шестерен с параметрами: $m = 10$ мм; $z_ш = 15$; $z_к = 26$.

sb1016.indd 25 12.10.2016 10:34:16

Суммарный объемный износ одного зуба шестерен, имеющихся в агрегате:

$$V_{v0} = V_{v(1)} + V_{v(2)} + ... + V_{v(n)} =$$
$$= mL\left(U_{г1} + U_{г2} + ... + U_{гn} + U_{н1} + U_{н2} + ... + U_{нn} + \right.$$
$$\left. + \ 2U_{д1} + 2U_{д2} + ... + 2U_{дn}\right).$$

Линейный износ зубьев всех шестерен:

для головок

$$U_{г0} = U_{г1} + U_{г2} + ... + U_{гn};$$

для ножек

$$U_{н0} = U_{н1} + U_{н2} + ... + U_{нn};$$

для зон "чистого" качения

$$U_{д0} = U_{д1} + U_{д2} + ... + U_{дn}.$$

Тогда общий объемный износ одного зуба имеющихся в агрегате шестерен:

$$V_{v0} = \frac{mL\left(U_{г0} + U_{н0} + 2U_{д0}\right)}{2}. \qquad (2)$$

Определим коэффициент распределения продуктов износа:

для n-й шестерни

$$k_{иn} = \frac{U_{vn}}{U_{v0}} = \frac{U_{гn} + U_{нn} + 2U_{дn}}{U_{г0} + U_{н0} + 2U_{д0}}.$$

Объем продуктов износа, приходящийся на один зуб:

для n-й шестерни

$$V_{п.иn} = \frac{k_{ш}\varepsilon_{п.и}G_{м}\left(U_{гn} + U_{нn} + 2U_{дn}\right)}{\gamma_{п.и}z_n\left(U_{г0} + U_{н0} + 2U_{д0}\right)},$$

где z_n — число зубьев n-й шестерни.

Объем продуктов износа, приходящийся на один зуб имеющихся в агрегате шестерен:

$$V_{иn} = \frac{k_{ш}\varepsilon_{п.и}G}{\gamma_{п.и}z_1z_2...z_n}\times$$
$$\times\left(z_2z_3...z_nk_{и1} + z_1z_3...z_nk_{и2} + ... + z_1z_2z_{(n-1)}k_{иn}\right).$$

Рассчитаем объем продуктов износа, выпадающих в масло агрегата из одного зуба за полный срок службы:

для n-ой шестерни

$$V_{vпn} = \frac{mL\left(U_{гпn} + U_{нпn} + 2U_{дпn}\right)}{2},$$

где $U_{гпn}$, $U_{нпn}$, $U_{дпn}$ — линейный износ головки, ножки зубьев и зоны начальных окружностей всех шестерен в агрегате.

Объемный износ одного зуба из имеющихся в агрегате шестерен:

$$V_{vп0} = V_{vп1} + V_{vп2} + ... + V_{vпn} =$$
$$= \frac{mL}{2}\begin{pmatrix} U_{гп1} + U_{гп2} + ... + U_{гпn} + U_{нп1} + U_{нп2} + ... + \\ + \ U_{нпn} + 2U_{дп1} + 2U_{дп2} + ... + 2U_{дпn} \end{pmatrix}.$$

Определим суммы линейного износа головок, ножек зубьев и зоны начальных окружностей имеющихся шестерен в агрегате:

$$U_{гп0} = U_{гп1} + U_{гп2} + ... + U_{гпn};$$

$$U_{нп0} = U_{нп1} + U_{нп2} + ...U_{нпn};$$

$$U_{дп0} = 2U_{дп1} + 2U_{дп2} + ...2U_{дпn}.$$

Тогда общий объемный износ зубьев шестерен в агрегате:

$$V_{vп0} = \frac{mL\left(U_{гп0} + U_{нп0} + 2U_{дп0}\right)}{2}.$$

Концентрация продуктов износа, выпадающих в масло агрегата в результате износа зубьев шестерен, составляет:

$$\varepsilon_{п.и.ш} = \frac{mL\left(U_{гп0} + U_{нп0} + 2U_{дп0}\right)\gamma_{п.и}}{2G_{м}}.$$

Расчетное значение коэффициента, учитывающего долю продуктов износа, выпадающих в масло агрегата из зубчатых колес $k_{эш}$, при параметрах двухступенчатого редуктора с модулем зацепления m = 0,01 м и длиной зуба шестерен L = 0,055 м, числом зубьев ведущей шестерни $z_{ш12}$ = 15 и передаточным отношением i_{12} = 1,73, твердостью ведущей шестерни $НВ_{ш12}$ = 4500 МПа и ведомой шестерни $НВ_{к12}$ = 3500 МПа, определенных по скоростям изнашивания зубьев шестерен и элементов подшипников качения, составляет 0,97.

Предположим, что зубья всех шестерен агрегатов трансмиссии машин, отработавших полный срок службы, независимо от механических свойств материалов, геометрических и кинематических параметров зацепления, имеют одинаковый износ. Тогда объем продуктов износа, приходящийся на один зуб шестерен, равен:

$$V_{1п.и.ш} = \frac{G_{п.и.ш}}{z_{с}\gamma_{п.и}}.$$

Учитывая то, что в шестернях наибольший износ происходит на головке и ножке зубьев шестерен, а наименьший — в зоне "чистого"

sb1016.indd 26 12.10.2016 10:34:16

качения, и что износ зубьев по профилю меняется по линейному закону относительно их высоты [4—7], кривую линейного износа зубьев на рис. 1 можно разделить на две трапеции: с положительным значением k, соответствующим головке зуба, и отрицательным значением k, соответствующего ножке зуба [4, 8].

Площадь четырехугольника, характеризующая износ профиля зуба, построенная в соответствии с рис. 1 равна:

$$F_h = \frac{V_{1\text{п.и.ш}}}{L} = \frac{G_{\text{п.и.ш}}}{z_{\text{с}}\gamma_{\text{п.и}}L} = \frac{k_{\text{ш}}G_{\text{п.и}}}{z_{\text{с}}\gamma_{\text{п.и}}L} = mU_{\text{ср}}.$$

Средний линейный износ головки и ножки зуба

$$U_{\text{ср}} = \frac{k_{\text{ш}}G_{\text{п.и}}}{z_{\text{с}}\gamma_{\text{п.и}}Lm}.$$

Тогда линейный износ головки (ножки) зуба с учетом проскальзывания между зубьями шестерен [8] равен:

$$U_{\text{г,н}} = \frac{U_{\text{ср}}\left(1 \pm (z_{\text{ш}} \pm 1)\left(\sqrt{z_{\text{ш}}^2 \sin^2\alpha + 4z_{\text{ш}} \pm 4} - z_{\text{ш}}\sin\alpha\right)\right)}{z_k z_{\text{ш}}}. \quad (3)$$

В выражении (3) знак плюс относится к головке, а знак минус — к ножке зуба.

Линейный износ зуба зоны "чистого качения" равен:

$$U_{\text{д}} = U_{\text{ср}} - \frac{(U_{\text{г}} + U_{\text{н}})}{2}.$$

На рис. 2 представлены зависимости, полученные при: m = 0,01 м; L = 0,05 м; $k_{\text{ш}}$ = 0,97; $\gamma_{\text{п.и}}$ = 7800 кг/м^3; $G_{\text{м}}$ = 15,3 кг; $z_{\text{ш}}$ = 15; z_k = 26; $z_{\text{с}}$ = 114; α = 20°. Наибольший износ происходит на головке и ножке зубьев, где относительное проскальзывание между зубьями шестерен наибольшее, а наименьший наблюдается в зоне "чистого" качения, где отсутствует проскальзывание между зубьями шестерен.

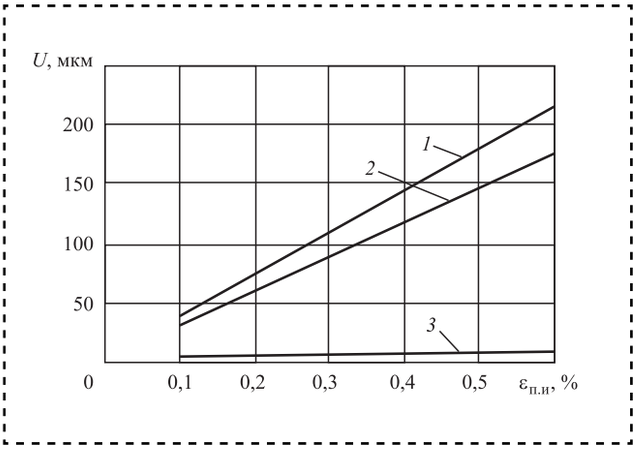


Рис. 2. Графики изменения линейного износа головки (*а*), ножки (*б*) и зоны "чистого" качения (*в*) зубьев шестерен в зависимости от концентрации продуктов износа в масле

Полученные аналитические зависимости показывают, что линейный износ зубьев шестерен увеличивается с ростом концентрации продуктов износа в масле и уменьшается с повышением общего числа зубьев шестерен, длины зуба и модуля зацепления.

Прогнозирование износа элементов шариковых подшипников качения. В связи с вращением внутреннего (наружного) кольца и свободным движением шарика по желобам колец принимаем, что они изнашиваются по поверхностям качения равномерно. При отсутствии перекоса колец из-за радиального зазора между наружным кольцом и шариком не возникает радиальная сила и изнашивается только часть поверхностей трения наружного кольца, причем наибольший износ по периметру наружного кольца наблюдается на поверхности кольца, где расположены наиболее нагруженные шарики подшипника. При небольших нагрузках на шарик износ уменьшается за счет уменьшения деформационной составляющей износа [9, 12].

Из-за перекоса колец между шариком и наружным кольцом возникают осевые силы, прижимающие шарики к боковым поверхностям желобов внутреннего и наружного колец. Величина этой силы имеет наибольшее значение на плоскости действия радиальной силы, поэтому наружное кольцо больше изнашивается в этих точках [9, 12].

Наибольший износ по дуге контакта шарика с кольцом подшипника наблюдается на поверхности, где происходит большее проскальзывание, т.е. на грани желобов колец.

Шарикоподшипник, отработавший 1000 моточасов в эксплуатационных условиях, изнашивается по периметру равномерно. Величина износа внутреннего кольца — 63,1 %; наружного кольца — 33,3 % и шарика — 3,6 % [1, 10]. Тогда износостойкость элементов подшипника относительно износа внутреннего кольца составляет: внутреннее кольцо — 1,0, наружное кольцо — 0,528 и шарика — 0,057.

Для конструкции шариковых подшипников одного типоразмера принято, что половина угла охвата шарика желобами внутреннего и наружного колец имеют равные значения независимо от конструктивных параметров подшипника.

sb1016.indd 27 12.10.2016 10:34:17

Приближенно можно принимать, что кривизна желоба кольца соответствует профилю шариков.

В агрегатах силовых передач машин стремятся устанавливать подшипники с одинаковым ресурсом. Данное положение подтверждается аналитическим выражением для расчета скорости изнашивания внутреннего кольца, так как скорость изнашивания пропорциональна нагрузке [19].

Объем продуктов износа элементов подшипника. Для желобов внутреннего и наружного колец (в общем виде) n-го подшипника

$$V_n = 0,0548\beta d_{жn} d_{шn} U_n.$$

Для шарика n-го подшипника

$$V_{шn} = 3,14 d_{шn}^2 U_{шn} n_{шn}.$$

Общий объем продуктов износа подшипников, находящихся в агрегате, определяют по сумме объемов продуктов износа всех имеющихся внутренних, наружных колец и шариков с учетом относительного износа внутреннего кольца.

Сумма объемов продуктов износа элементов n-го подшипника

$$V_{п.иn} = 0,0259 d_{шn} U_{вn} \times$$
$$\times \left(2,116\beta d_{в.жn} + \beta d_{н.жn} + 6,696 d_{шn} n_{шn}\right).$$

Тогда общий объем продуктов износа всех подшипников с учетом коэффициента относительной износостойкости внутреннего кольца равен:

$$V_п = 0,0259 \times$$
$$\times\left(d_{ш1} U_{в1}\left(2,116\beta d_{в.ж1} + \beta d_{н.ж1} + 6,696 d_{ш} n_{ш1}\right) + \right.$$
$$+ d_{ш2} U_{в2}\left(2,116\beta d_{в.ж2} + \beta d_{н.ж2} + 6,696 d_{ш2} n_{ш2}\right) + \ldots$$
$$\left. + d_{шn} U_{вn}\left(2,116\beta d_{в.жn} + \beta d_{н.жn} + 6,696 \mathrm{d}_{шn} n_{шn}\right)\right).$$

Диаметр наружного кольца по желобу больше, чем внутреннего кольца на два диаметра шарика, число шариков согласно конструкции подшипников принимаем равным 14.

Половина угла охвата шарика желобами внутреннего и наружного колец — 0,42 радиан (24°), $\Gamma_1 = 0,0137 d_{в.ж1} + d_{ш1}$, $\Gamma_2 = 0,0137 d_{в.ж2} + d_{ш2}$ и $\Gamma_n = 0,0137 d_{в.жn} + d_{шn}$, тогда:

$$V_п = 2,45\left(d_{ш1} U_{в1}\Gamma_1 + d_{ш2} U_{в2}\Gamma_2 + \ldots + d_{шn} U_{вn}\Gamma_n\right).$$

Обозначив изменение радиального зазора S за один срок замены масла с учетом износа внутреннего, наружного колец и шарика относительно износа внутреннего кольца в общем виде (рис. 3):

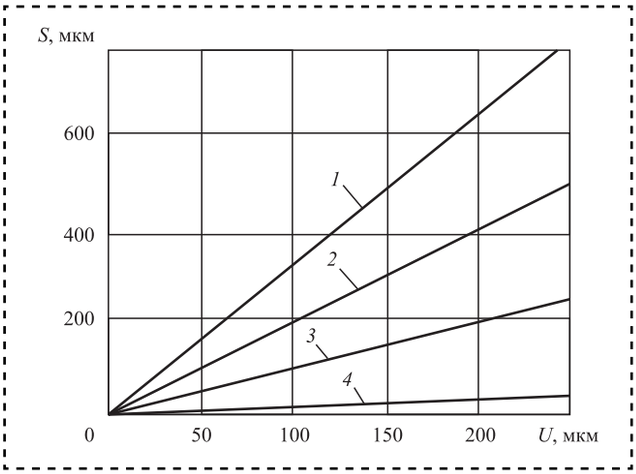


Рис. 3. Графики изменения радиального зазора шарикового подшипника в зависимости от линейного износа его элементов:
1 — общий радиальный зазор; *2* — радиальный зазор внутреннего кольца; *3* — радиальный зазор наружного кольца; *4* — радиальный зазор шарика

$$S_i = 2\left(U_{вi} + U_{нi} + 2U_{шi}\right) =$$
$$= 2U_{вi}\left(1 + 0,528 + 0,114\right) = 3,284 U_{вi}.$$

Решив полученное выражение для расчета радиального зазора относительно износа внутреннего кольца шарикового подшипника, получим:

$$U_{вi} = S_i / 3,284.$$

Тогда изменение концентрации продуктов износа масла агрегата от износа внутренних колец всех шариковых подшипников в агрегате:

$$\varepsilon_{п.иn} = \frac{2,45\gamma_{п.и}}{G_м} \times$$
$$\times\left(d_{ш1} U_{в1}\Gamma_1 + d_{ш2} U_{в2}\Gamma_2 + \ldots + d_{шn} U_{вn}\Gamma_n\right).$$

Концентрация продуктов износа, рассчитанная по изменению радиального зазора в шариковых подшипниках, равна

$$\varepsilon_{п.иn} = \frac{0,746\gamma_{п.и}}{G_м} \times$$
$$\times\left(d_{ш1} S_1\Gamma_1 + d_{ш2} S_2\Gamma_2 + \ldots + d_{шn} S_n\Gamma_n\right).$$

Прогнозирование износа шлицевых соединений. При обеспечении объемной прочности и нормальной посадки рабочих поверхностей, составляющих частей шлицевых соединений, их износ зависит от интенсивности (частоты) нагружения, длины расположения нагружаемой поверхности

sb1016.indd 28 12.10.2016 10:34:17

от центра шлицевого соединения и твердости материала валов и шестерен. Результаты микрометража составляющих частей шлицевых соединений дополнительной конечной передачи трактора показали, что больше изнашиваются места посадки шлица ведущего вала и посаженной на него шестерни по сравнению со шлицем ведомого вала и ведомой шестерни. Причем больше изнашиваются поверхности выступа шлица. По мере увеличения расстояния от поверхности выступов износ шлица уменьшается. Учитывая эпюры износа и соотношения твердостей шлица вала и зубчатого колеса, определим износ впадины под шлиц вала через величину износа выступа шлица ведущей шестерни [1]:

$$U_{2в} = \frac{U_{1в}\left(R_в - L\right)}{R_в},$$

а износ впадины шлица шестерни — через величину износа выступа шестерни:

$$U_{2ш} = \frac{U_{2ш}\left(R_в - L\right)}{R_в}.$$

Износостойкость детали прямо пропорциональна твердости материала, тогда

для впадины шлица шестерни

$$U_{2ш} = \frac{\text{НВ}_ш U_{2в}}{\text{НВ}_в};$$

для выступа шлица шестерни

$$U_{1ш} = \frac{U_{2в}\left(R_в - L\right)\text{НВ}_ш}{R_в \text{НВ}_в}.$$

Площадь эпюры износа:

шлица вала шестерни

$$F_в = \frac{U_{2в}}{2}\left(1 + \frac{R_в - L}{R_в}\right)L;$$

шлица шестерни

$$F_ш = \frac{U_{2ш}}{2}\left(1 + \frac{R_в - L}{R_в}\right)L.$$

Объем продуктов износа шлица вала шестерни

$$V_в = \frac{U_{2в}}{2}\left(1 + \frac{R_в - L}{R_в}\right)LL_ш,$$

где $L_ш$ — длина шлица шестерни.

Объем продуктов износа одного зуба от износа шлица шестерни

$$V_ш = \frac{U_{2ш}}{2}\left(1 + \frac{R_в - L}{R_в}\right)LL_ш.$$

Обозначив

$$U_{2ш} = \frac{U_{2в}\text{НВ}_в}{\text{НВ}_ш},$$

получим

$$V_ш = \frac{U_{2в}}{2}\left(\frac{\text{НВ}_в}{\text{НВ}_ш} + \frac{R_в - L}{R_в}\right)LL_ш.$$

Тогда общий объем продуктов износа всех зубьев от износа

шлица вала

$$V_{ш0} = \frac{U_{2в}}{2}\frac{R_в - L}{R_в}LL_ш z_в,$$

где $z_в$ — число зубьев шлица вала;

шлица шестерни

$$V_{ш0} = \frac{U_{2в}}{2}\left(\frac{\text{НВ}_в}{\text{НВ}_ш} + \frac{R_в - L}{R_в}\right)LL_ш z_ш,$$

где $z_ш$ — число зубьев шлица шестерни.

Общая концентрация продуктов износа, выпадающих в масло агрегата из шлицевого соединения от износа:

шлица вала

$$\varepsilon_{п.и.ш} = \frac{U_{2в}}{G_м}\left(\frac{(R_в - L)}{R_в} + \frac{\text{НВ}_в}{2\text{НВ}_ш}\right)LL_ш z_в \gamma_{п.и};$$

шлица шестерни

$$\varepsilon_{п.и.ш} = \frac{U_{2ш}}{G_м}LL_ш z_ш \gamma_{п.и}.$$

Общая концентрация продуктов износа в масле агрегата с учетом износа зубчатых передач, подшипников качения и шлицевых соединений:

$$\varepsilon_п = \frac{\gamma_{п.и}}{2G_м}\left(mL\left(U_{гп0} + U_{нп0} + 2U_{дп0}\right) + \right.$$
$$+ 4{,}90\left(d_{ш1}U_{в1}\Gamma_1 + d_{ш2}U_{в2}\Gamma_2 + \ldots + d_{шn}U_{вn}\Gamma_n\right) +$$
$$\left. + 2U_{2ш}LL_ш z_ш\right).$$

Выводы

Концентрация продуктов износа в случае утечки и с учетом доливки в агрегат масла в процессе эксплуатации зависит от доли утекшего из картера и прироста концентрации продуктов износа в масле между двумя доливками, характеризующимися степенью герметичности агрегата.

sb1016.indd 29 12.10.2016 10:34:17

Концентрация продуктов износа, выпадающих в масло агрегата из зубьев шестерен, пропорционально увеличивается с повышением модуля зацепления, длины зуба и суммы линейных износов головки, ножки зубьев и удвоенного износа зоны начальной окружности.

Концентрация продуктов износа, выпадающих в масло агрегатов из шариковых подшипников, увеличиваются с повышением диаметра шариков, диаметра колец по их желобу и линейного износа внутренних и наружных колец (изменению радиального зазора в подшипнике). Радиальный зазор подшипника увеличивается в 3,284 раза больше, чем линейный износ внутреннего кольца за один и тот же период работы подшипника.

Количество продуктов износа шлицевых соединений, выпадающих в масло агрегата, повышается с увеличением бокового износа шлицев, числа зубьев, площади посадочной поверхности по длине шлицев вала и шестерни и твердостей материала вала и шестерни.

Библиографический список

1. **Иргашев А.И., Мирзаев Н.Н., Иргашев Б.А.** Оценка износа деталей агрегатов машин по концентрациям продуктов износа в масле. Ташкент: ТашГТУ, 2012. 160 с.
2. **Иргашев А.И., Иргашев Б.А.** Износостойкость зубчатых передач. Ташкент: ТашГТУ, 2013. 165 с.
3. **Иргашев А.И., Мирзаев К.К., Иргашев Б.А.** Повышение износостойкости зубчатых передач. Ташкент: ТашГТУ, 2015. 174 с.
4. **Икрамов У.А., Иргашев А.И., Махкамов К.Х.** Расчетная модель для оценки износостойкости зубчатых передач по концентрациям продуктов износа в масле // Трение и износ. 2003. Т. 24. № 6.
5. **Особенности** изнашивания зубьев шестерен, привода шаровых барабанных мельниц / А.И. Цыпак и др. // Трение и износ. 1990. Т. 11. № 2. С. 323—327.
6. **Корнилович С.А., Паутов П.И.** Повышение ресурса зубчатых передач // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2000. № 7.
7. **Кухтов В.Г., Полянский А.С.** Долговечность зубчатых колес и бортовых редукторов // Тракторы и сельхозмашины. 1999. № 4.
8. **Иргашев Б.А., Иргашев А.И.** Прогнозирование расхода запасных частей машин по содержанию продуктов износа в масле // Трение и износ. 2015. Т. 36. № 5. С. 577—585.
9. **Ахраменко Н.А., Купреев М.П., Мельниченко И.М.** Влияние перекоса колец подшипника качения на его долговечность // Трение и износ. 1990. Т. 11. № 6. С. 996—1001.
10. **Контроль** технического состояния тракторных деталей при ремонте: справочник. М.: Колос, 1973. 624 с.
11. **Мышкин Н.К., Петроковец М.И.** Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: Физматлит, 2007. 368 с.
12. **Мирзаев К.К., Иргашев А.И.** Износостойкость шариковых подшипников качения, работающих в абразивной среде // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 5.

Читайте в следующем номере:

Добров И.В. К вопросу теории механики процесса внешнего трения скольжения твердых тел по горизонтальной плоскости (часть I)

Болдырев С.В., Белоусов А.М., Бударова О.П. Экспериментальные исследования по определению влияния механических примесей, содержащихся в масле, на износ качающего узла аксиально-поршневого насоса

Гурьянов Г.Н. Влияние коэффициентов контактного трения и вытяжки проволоки на радиальную силу в рабочем конусе волоки

sb1016.indd 30 12.10.2016 10:34:18

УДК 621.882.082.1

С.Я. Березин, *д-р техн. наук,* **А.Р. Карпов**
(Забайкальский государственный университет, г. Чита)
E-mail: Berlog_berezin2011@mail.ru

Энергетический принцип оценки стопорящих свойств резьбовых соединений с волнистым профилем витков одной из деталей

Представлен новый подход к анализу стопорящих свойств резьбовых соединений различного типа. Предложен метод, основанный на сравнении площадей эпюр, ограниченных линиями осциллограмм записи крутящих моментов затяжки и отвинчивания крепежных деталей. Данные площади эквивалентны работам сборки—разборки. Сравнение энергетики этих процессов позволяет более качественно оценить стопорящие свойства и анализировать особенности каждого типа соединений по сопротивлению крепежных деталей отвинчиванию. Описаны математический аппарат, методика и техническое оснащение исследований.

A new way to the analysis of the properties of the locking threaded connections of various types is submitted. The method is based on a comparison of diagrams areas, limited lines oscillograms recording torque tightening and unscrewing fasteners. These areas are equivalent to the work of assembly and unscrewing. Comparing the energy of these processes allows for a more qualitative assessment of locking properties and analyzes the characteristics of each type of joints on fasteners resist unscrewing. The mathematical apparatus, technique equipment of researches are described.

Ключевые слова: резьбовое соединение, затяжка, отвинчивание, стопорение, сборка, демонтаж, крутящий момент, эпюра, осциллограмма, волнистый профиль, шпилька, коэффициент эффективности стопорения, интегральный показатель, сбег резьбы, планетарное резьбонарезание.

Keywords: screw joint, tightening, unscrewing, locking, assembly, dismantling, torque, curve, oscillogram, wavy surface, stud, locking efficiency ratio, integral indicator, thread run-out, orbital threading.

Современная технология затяжки резьбовых соединений предусматривает не только разработку новых способов стопорения, т.е. повышения устойчивости соединения к отвинчиванию, но и перспективных способов контроля силы затяжки.

Моменты затяжки нормированы ВНИИМАШ для различных значений коэффициентов трения в резьбе $f_р$ и по торцу гайки $f_т$, а также для наиболее распространенных в промышленности покрытий и типов смазок.

Соединения с волнистым профилем резьбы на одной из крепежных деталей относятся к типу соединений с натягом, поэтому их устойчивость к отвинчиванию наиболее часто сравнивают со свойствами соединений с радиальным натягом по ГОСТ 4608—81, для которых коэффициенты стопорения $K_с$ = 0,6...0,8 [1]. Данные значения определяются только первой сборкой, при повторном завинчивании значение коэффициента повышается. Это не связано с повышением устойчивости к отвинчиванию. Момент завинчивания при повторной сборке приближается к значению момента отвинчивания.

Резьбовые соединения с волнистым профилем обладают высоким стопорящим моментом за счет локального внедрения вершин волнистого профиля в области верхних витков при затяжке соединения на глубину $\Delta_в + \Delta_Q$, где $\Delta_в$ — расчетный натяг в контакте, обеспеченный амплитудой волны; Δ_Q — глубина внедрения от силы затяжки [2].

Оценка стопорящих свойств соединений одним лишь коэффициентом $K_с$ в виде отношения максимальных значений крутящих моментов отвинчивания и затяжки не всегда адекватно отражает стопорящие свойства соединений.

Рассмотрим процесс завинчивания стандартной крепежной шпильки в гнездо с резьбой волнистого профиля (рис. 1).

Основные моментные нагрузки:

$M_{отв}$ — момент страгивания крепежной детали, необходимый для вывинчивания крепежного элемента из гнезда;

$M^*_{отв}$ — реальное значение крутящего момента отвинчивания с учетом фактора времени и других условий;

sb1016.indd 31 12.10.2016 10:34:18

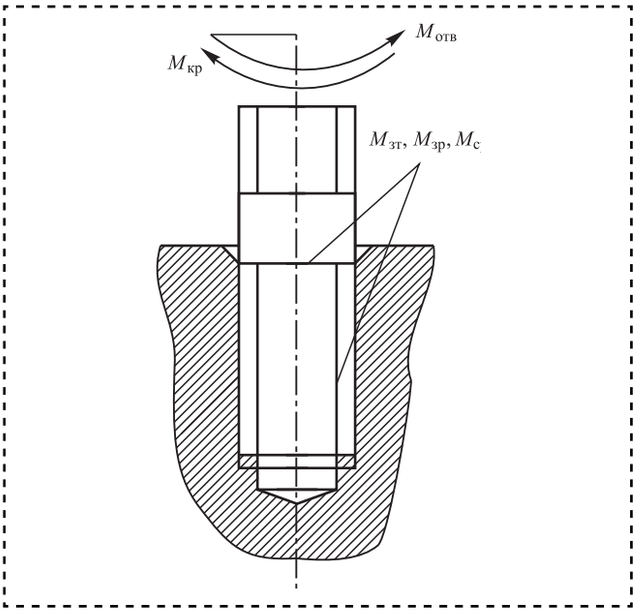


Рис. 1. Силовые параметры процесса завинчивания и демонтажа шпильки

$M_з$ — суммарный момент затяжки шпильки в гнезде;

$M_{ст}$ — момент сопротивления отвинчиванию по дополнительному элементу (сбегу резьбы, с упором в дно, в шарик и пр.);

$M_{ср}$ — стопорящий момент по тугой резьбе;

$M_{зт}$ — момент затяжки по дополнительным элементам (сбегу резьбы, с упором в дно, в закладную деталь и т.д.);

$M_{зр}$ — конечное значение момента завинчивания по тугой резьбе;

$M_{кр}$ — текущее значение крутящего момента завинчивания шпильки на всем протяжении процесса;

$[M]$ — предельный момент завинчивания условиям прочности;

$M_{тор}$ — торсионный момент скручивания стержня.

Суммарные моменты затяжки при сборке различных соединений могут включать разные составляющие. Например, при завинчивании деталей по тугой резьбе (соединения с натягом), момент затяжки равен

$$\begin{cases} M_з = M_{кр\,max} = M_{зр} + M_{зт}; \\ M_з \leqslant [M], \\ M_{зт} = 0 \quad \text{при отсутствии дополнительных элементов;} \\ M_{зт} \neq 0 \quad \text{при наличии дополнительных элементов затяжки.} \end{cases} \qquad (1)$$

При завинчивании шпилек по резьбе с зазором момент $M_з$ равен значению $M_{зт}$. На этапе разборки соединения непосредственно после завинчивания имеет место следующий баланс моментов:

$$M^*_{отв} = M_{отв}K_в + M_{тор} = M_{ср} + M_{ст}, \qquad (2)$$

где $K_в$ — коэффициент, учитывающий фактор времени и другие условия.

Тогда непосредственный момент отвинчивания (сразу после затяжки) можно определить в виде

$$M_{отв} = (M_{ср} + M_{ст} - M_{тор})/K_в. \qquad (3)$$

С учетом фактора времени в материале удерживающих участков происходит релаксация напряжений, и стопорящие свойства несколько снижаются (заштрихованная область на рис. 2).

Коэффициент эффективности стопорения представлен углом наклона гипотенузы, проходящей через точку пересечения значений $M_з$ и $M_{отв}$ (при равенстве этих значений $K_с = 1$ — точка "a" (см. рис. 2):

$$K_с = \frac{\left(M^*_{отв}\right)M_{отв}}{M_з}. \qquad (4)$$

В такой форме коэффициент не вполне адекватно оценивает устойчивость соединения к отвинчиванию. В работе [2] приводятся коэффициенты $K_с$ для различных способов стопорения:

$K_с$ = 0,6...0,8 — посадка по резьбе с натягом;

$K_с$ = 0,5...0,85 — затяжка по сбегу резьбы:

$K_с$ = 0,5...0,63 — затяжка с упором в дно отверстия:

$K_с$ = 0,7...1,1 — завинчивание резьбовыдавливающих шпилек.

Представленные диапазоны распределения коэффициентов значительно перекрывают друг друга, что затрудняет выбор того или иного спо-

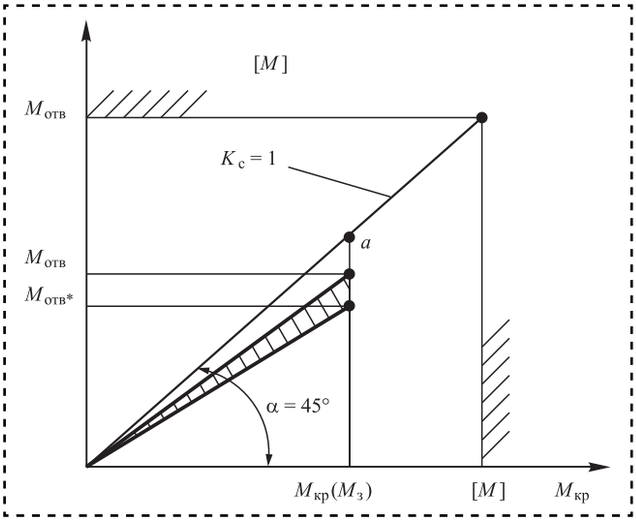


Рис. 2. Соотношение крутящих моментов сборки и разборки соединений

sb1016.indd 32 12.10.2016 10:34:18

соба стопорения. Нижние пределы мало отличаются по своим значениям и не могут являться индикатором, по которому можно отличить один способ от другого и сравнить степени устойчивости резьбовых пар к отвинчиванию. Вершины полигонов распределения также имеют незначительные смещения.

Для оценки работоспособности соединений предлагаем применять интегральный показатель эффективности стопорения. Он представляет собой отношение работы, затраченной на отвинчивание установленной крепежной детали к работе, необходимой на ее завинчивание и затяжку. Характерные формы осциллограмм крутящих моментов на переходах завинчивания и отвинчивания крепежной детали показаны на рис. 3.

Каждая кривая крутящих моментов и продольная ось числа витков Z ограничивают определенные эпюры, площадь которых для перехода завинчивания равна S_1, а для перехода вывинчивания — соответственно S_2. Численные значения этих площадей соответствуют той работе, которая затрачивается на конкретный переход.

Для получения экспериментальных значений интегрального показателя эффективности стопорения проведена серия испытаний четырех типов резьбовых соединений, образованных стандартными шпильками М12×1,5 из стали 35, завинчиваемых в отверстия образцов из алюминиевого сплава АК9ч (АЛ4) по разной технологии. В каждой из четырех групп проводили по три завинчивания с последующей разборкой.

Первую группу собирали путем завинчивания шпильки в резьбовое отверстие с последующей затяжкой по сбегу резьбы до нормированного значения момента, после чего выдерживали в течение минуты и вывинчивали. Нормированное значение момента устанавливали муфтой предохранительного патрона. Крутящие моменты регистрировали тензометрической аппаратурой.

Вторая группа собиралась путем завинчивания шпилек с той же резьбой, но уже в гладкие отверстия диаметром, соответствующим среднему диаметру резьбы.

Третья группа соответствовала соединениям с радиальным натягом. Для этого резьбу в отверстиях нарезали однониточной фрезой на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ планетарным способом. Средний диаметр внутренней резьбы формировался программой таким образом, чтобы относительно среднего диаметра резьбы шпильки был образован натяг 36...42 мкм. Сборку и демонтаж проводили аналогично вышеприведенным группам.

В четвертой группе внутренняя резьба имела волнистый профиль и нарезалась станком с ЧПУ с планетарным движением стола, а к вертикальной подаче добавлялось осциллирующее движение [3]. Высота волны внутреннего среднего диаметра относительно среднего диаметра гладкой резьбы шпильки формировала натяг в пределах 50...60 мкм.

После соответствующих сборок—разборок расшифровывали осциллограммы с записью координат (значений моментов) опорных точек по виткам резьбы и составляли координатные таблицы в среде Excel с формированием аппроксимирующих линий тренда и получением уравнений в полиномиальной или иной форме. Площади эпюр моментов S_1 и S_2 вычисляли после получения 24 эмпирических уравнений аппроксимирующих кривых (12 уравнений для эпюр завинчивания и 12 для эпюр отвинчивания) по формулам:

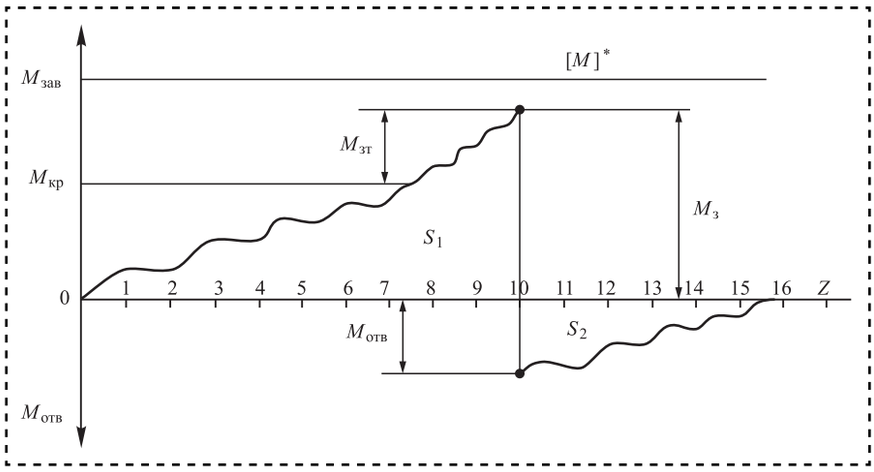


Рис. 3. Пример записи осциллограмм крутящих моментов завинчивания, затяжки крепежной детали и ее отвинчивания

$$\begin{cases} S_1 = \int\limits_0^{Z_к} F\left(M_{кр};\, Z\right) dZ; \\ S_2 = \int\limits_0^{Z_0} F\left(M_{отв};\, Z\right) dZ, \end{cases} \quad (5)$$

где $Z_к$ — конечное число витков завинчивания шпильки;

Z_0 — число витков, при которых момент отвинчивания снижается до нуля;

$F\left(M_{кр};\, Z\right)$; $F\left(M_{отв};\, Z\right)$ — аппроксимирующие эмпирические уравнения соответствующих переходов.

Интегральный показатель эффективности стопорения:

sb1016.indd 33 12.10.2016 10:34:18

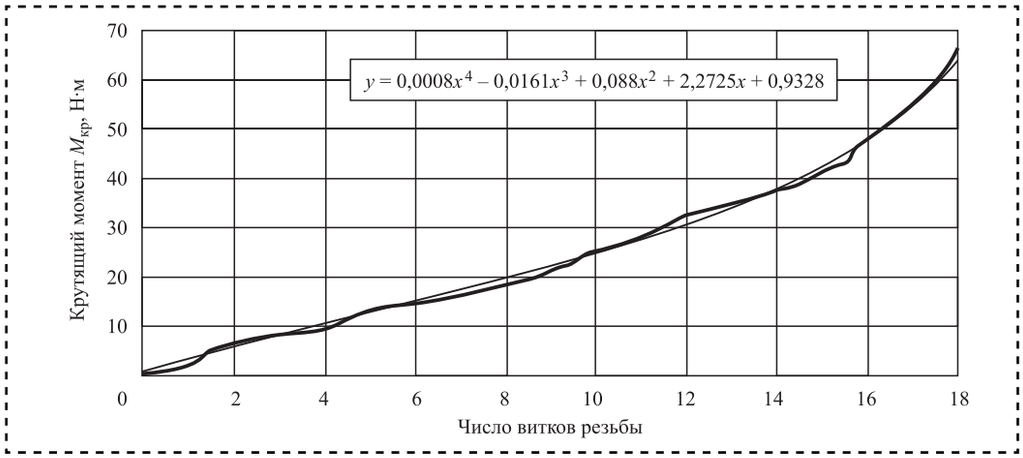


Рис. 4. Кривая момента завинчивания с аппроксимирующей линией тренда и уравнением

$$K_{си} = \frac{K_в \int_0^{Z_0} F\left(M_{отв};\, Z\right) dZ}{\int_0^{Z_к} F\left(M_{кр};\, Z\right) dZ}, \qquad (6)$$

где $K_в$ — коэффициент, учитывающий фактор времени и другие условия.

На рис. 4 приведен пример обработанной осциллограммы момента завинчивания шпильки в отверстие с волнистой резьбой. В уравнении переменная x соответствует числу витков.

Интегрируя полученные эмпирические уравнения по конечным значениям чисел витков завинчивания и отвинчивания, рассчитали площади эпюр S_1 и S_2. Каждая пара этих значений представляла собой точку на графике в координатах указанных площадей (рис. 5). Эти точки и соответствовали значениям интегрального показателя эффективности стопорения для всех 12 экспериментов. Все четыре способа получения соединений образовали соответствующие группы точек интегрального показателя:

1-я группа — соединения с натягом;

2-я — соединения с зазором и затяжкой по сбегу резьбы;

3-я — соединения с волнистым профилем внутренней резьбы;

4-я — шпильки, завинченные в гладкие отверстия.

Группы достаточно изолированы друг от друга и это, в отличие от указанных выше оценок по коэффициенту $K_с$, более корректно характеризует индивидуальные свойства каждого из типов исследуемых соединений. Каждая группа характеризуется вектором, соединяющим начало координат и центр группирования, а также углом наклона данного вектора относительно оси абсцисс. Отсюда можно сделать вывод: чем больше длина вектора и меньше угол его наклона, тем выше стопорящие свойства соединений. Таким образом, взяв минимальные и максимальные значения площадей эпюр завинчивания и отвинчивания, всю область распределения этих значений можно разделить на четыре зоны. Зона I соответствует высоким значениям работы завинчивания $A_з$ и низким значениям работы отвинчивания $A_{отв}$. Зона II — $A_з \to \max$, $A_{отв} \to \max$. Зона III — $A_з \to \min$, $A_{отв} \to \max$. Зона IV — $A_з \to \min$, $A_{отв} \to \min$.

Группы *1* и *3* обладают высокими стопорящими свойствами, однако третья группа находится на более выгодных позициях, так как при относительно высоких значениях работы удержания шпильки имеет меньшие значения работы завинчивания, т.е. более высокий энергетический КПД.

У резьбовыдавливающих шпилек наиболее худшие свойства стопорения, так как они попали в зону I с высокой работой завинчивания и низкой работой стопорения. Это объясняется тем,

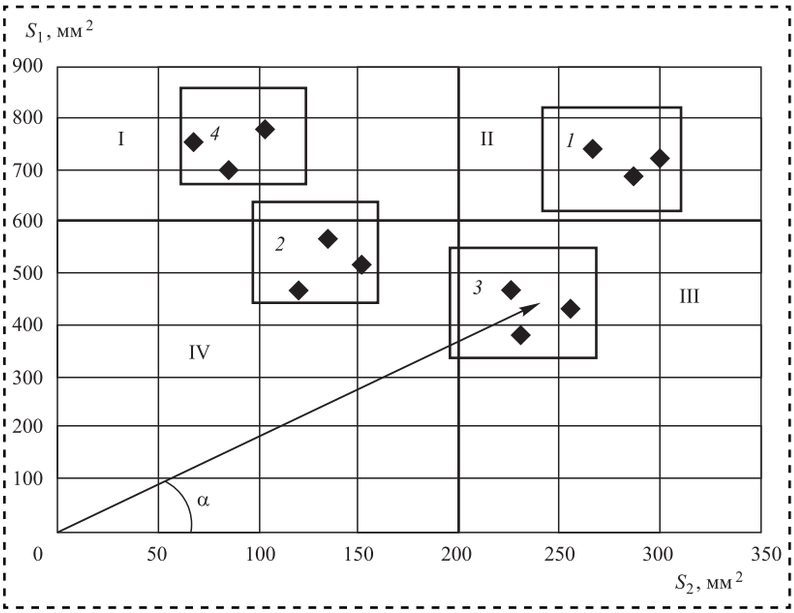


Рис. 5. Поле распределения экспериментальных значений интегрального показателя эффективности стопорения

sb1016.indd 34 12.10.2016 10:34:18

что стандартные накатанные шпильки несут небольшую конусность по наружному и среднему диаметрам за счет проседания материала в области торца от действия накатных роликов (краевой эффект), что влечет более высокую интенсивность роста крутящего момента на всем протяжении завинчивания. При отвинчивании данный эффект приводит к тому, что в начале отвинчивания крутящий момент весьма значительный, а в дальнейшем он резко снижается и на 2-й или 3-й нитке резьбы падает практически до нуля, затрачивая минимум работы удержания. Эта особенность установлена только с помощью интегрального показателя эффективности стопорения. Соотношение этих показателей: $K_с$ = 0,68...0,8, а $K_{си}$ = 0,09...0,133. Таким образом, коэффициент эффективности стопорения формирует ложное представление о стопорящих свойствах соединений и не позволяет выявлять индивидуальные особенности конкретных типов соединений относительно сопротивления крепежных деталей отвинчиванию.

Процесс установления интегрального показателя эффективности стопорения требует большей трудоемкости экспериментальных и аналитических работ, но его энергетическая сущность дает более правдивую информацию о поведении резьбовых соединений в статическом режиме. Данную методику можно использовать и для анализа устойчивости соединений в динамических режимах в условиях различных ударно-вибрационных нагрузок, что делает ее универсальной в исследовательской практике.

Библиографический список

1. **Якушев А.И., Мустаев Р.Х., Мавлютов Р.Р.** Повышение прочности и надежности резьбовых соединений. М.: Машиностроение, 1979. 215 с.

2. **Березин С.Я., Карпов А.Р.** Резьбовые соединения с периодическим контактом волнистого винтового профиля одной из деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 11. С. 20—28.

3. **Карпов А.Р.** Получение нерегулярных профилей резьб методом планетарного резьбофрезерования // Инновационные технологии в технике и образовании. VI Междунар. науч.-техн. конф. Чита: ЗабГУ, 2014. С. 24—27.

УДК 539.21

Т.Д. Каримбаев, *д-р техн. наук*
(Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва),
Н.С. Рапилбекова, *канд. физ.-мат. наук*
(Таразский государственный педагогический институт, Республика Казахстан)
E-mail: seisennag@list.ru; karimbayev@ciam.ru

Математическое моделирование периодически изменяющегося трехмерного температурного поля в многослойных цилиндрах

Исследования температурного поля в многослойном цилиндре с осевым разрезом во внутреннем слое проведены при помощи разработанного численного метода решения, основанного на обобщении метода прогонки на трехмерные задачи нестационарной теплопроводности.

Researches of a temperature field in the multilayered cylinder with an axial cut in an inside layer are spent on the basis of the developed numerical method of the decision based on generalization of a method of prorace on three-dimensional problems of non-stationary heat conductivity.

Ключевые слова: температура, пространственные координаты, теплопроводность, анизотропное тело, источники тепла, идеальный теплообмен, слоистые среды, устойчивость, аппроксимация.

Keywords: temperature, spatial coordinates, heat conductivity, an anisotropic body, heat sources, ideal heat exchange, layered environments, stability, approximation.

Введение

Разработанный авторами вариант численного решения задач нестационарной теплопроводности в слоистых телах является обобщением метода прямой и обратной прогонки на трехмерный случай в слоистых анизотропных средах [1—15]. При этом рассмотрены особенности реализации пространственного решения задач теплопроводности, в том числе, при скачкообразных изменениях в граничных условиях.

sb1016.indd 35 12.10.2016 10:34:18

Разработанные методы решения и исследований трехмерных задач нестационарной теплопроводности могут найти применение при проектировании элементов ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) [16, 17]. Повреждаемость зарядов твердого топлива РДТТ зависит не только от внешних механических нагрузок и их изменений, но и от тепловых нагрузок на протяжении всего его жизненного цикла. В работе [16] описаны типичные условия, при которых работают РДТТ, а также показана необходимость принятия специальных мер по тепловой защите несущих стенок корпуса двигателя, особенно облегченного корпуса, выполненного из новых конструкционных высокопрочных композиционных материалов на основе органических волокон. Разработана модель высокотемпературного воздействия на заряд и определено распределение температуры в многослойной конструкции камеры сгорания РДТТ при действии высоких температур на внутренней поверхности и торцах заряда твердого топлива на основе метода решения пространственных нелинейных задач нестационарной теплопроводности для слоистых сред.

1. Основные уравнения

Уравнения теплопроводности для k-го анизотропного слоя M-слойной среды ($M \geqslant 1$) в прямоугольной, цилиндрической и сферической системах координат могут быть записаны в однотипной форме [1—3]:

$$\lambda_{ij}^k T_{,ij}^k + \lambda_i^k T_{,i}^k + W^k = \rho^k c_\varepsilon^k \partial T^k / \partial t$$
$$(i, j = 1, 2, 3;\ k = 1, 2\ \ldots,\ M), \qquad (1)$$

где T — неизвестная температура, °С;

t — время ($t \geqslant 0$), с;

λ_{ij} — коэффициенты теплопроводности анизотропного тела, Вт/(см·°С);

λ_i — приведенные коэффициенты теплопроводности, зависящие от радиуса [2], Вт/(см·°С);

W — интенсивность внутренних источников тепла, Вт/см^3;

ρ — плотность материала, кг/см^3;

c_ε — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С).

По нижним повторяющимся индексам в уравнениях (1) предполагается суммирование, по индексам, стоящим после запятой, — дифференцирование по соответствующей координате. Для определенности слои ортогональны оси x_1; x_2 и x_3 расположены в плоскости слоя, образуя правую систему координат.

Уравнения (1) замыкаются начальными и граничными условиями.

Начальные условия. Распределение температуры T во всей многослойной среде в начальный момент времени задается в виде

$$T^k(x_i;\ 0) = T_0^k(x_i) \ \text{ при } \ t = 0\ (i = 1, 2, 3), \qquad (2)$$

где x_i — пространственные координаты (i, j = 1, 2, 3), изменяются в пределах $l_i \leqslant x_i \leqslant L_i$.

Граничные условия. Рассматривают граничные условия в виде конвективного теплообмена, что не является принципиальным ограничением на разработанный метод решения.

На наружных поверхностях $x_j = l_j$ и $x_j = L_j$ (j = 2, 3) выполняются условия

при $i = 1$

$$\left(\lambda_{ii}^k\right) T_{,i}^k \alpha_{0j}^k \left[T^k - T_{0j}^k\left(x_j;\ t\right)\right];\ x_j = l_i^1;\ x_j = l_i;$$

при $i = 1, 3$; ($j \neq i$) (3)

$$\left(\lambda_{ii}^k\right) T_{,i}^k = -\left(\alpha_{Lj}^k\right)\left[T^k - T_{Lj}^k\left(x_j;\ t\right)\right];$$
$$x_j = L_i^M;\ x_j = L_i,$$

где α — коэффициент теплообмена.

На границах контакта внутренних слоев $L_1^k = l_1^{k+1}$ ($1 \leqslant k \leqslant M - 1$) выполняются условия идеального теплового контакта

$$\left(\lambda_{11}\right)^k T_{,1}^k = \left(\lambda_{11}\right)^{k+1} T_{,1}^{k+1}$$
$$\text{и } \ T^k\left(x_2,\ x_3;\ t\right) = T^{k+1}\left(x_2,\ x_3;\ t\right). \qquad (4)$$

Уравнения нестационарной теплопроводности (1) решены при начальных (2) и граничных (3)—(4) условиях. Решение строят в безразмерных координатах относительно безразмерных искомых величин.

Разрешающие уравнения в безразмерном виде. Принята следующая форма безразмерных переменных и искомой функции

$$\tau = t/t^*;\ \xi_i = \left(x_i - l_i\right) / L^*(i = 1, 2, 3);$$
$$\theta^k\left(\xi_i;\ \tau\right) = \left[T^k\left(x_i;\ t\right) - T_0\right] \Big/ T^*, \qquad (5)$$

где t^*, L^* и T^* — характерное время, длина и температура.

Уравнения теплопроводности (1) для произвольного k-го слоя в безразмерной форме принимают вид

$$d\theta^k / d\tau = \mathrm{Fo}^k\left(\mu_{ij}^k \theta_{,ij}^k + \mu_i^k \theta_{,i}^k\right) + \omega^k. \qquad (6)$$

Производные в направлении осей ξ_i соответственно обозначены как $\theta_{,ij}^k$ и $\theta_{,i}^k$. Кроме того, принято

sb1016.indd 36 12.10.2016 10:34:19

$$\mathrm{Fo}^k = \lambda^* t^* / (L^*)^2 \rho^k c_\varepsilon^k;\ \mu_{ij}^k = \lambda_{ij}^k / \lambda^*;$$
$$\mu_i^k = \lambda_i^k / \lambda^*;\ \omega^k = W^k t^* / T^* \rho^k c_\varepsilon^k, \quad (7)$$

где Fo^k — параметр Фурье;

μ_{ij}^k — относительные коэффициенты теплопроводности;

μ_i^k — относительные коэффициенты приведенной теплопроводности [2];

ω^k — относительный источник тепла.

Начальные условия. Из равенств (5) и (2) следует

$$\theta^k(\xi;\ 0) = 0 \text{ при } \tau = 0. \quad (8)$$

Граничные условия. Условия (3) для произвольного k-слоя записаны в виде

при $i = 1$

$$\theta_{,i}^k = (\mathrm{Bi}_{0i})^k \left[\theta^k - \varphi_{0i}^k(\xi_j;\ \tau)\right];$$
$$\xi_i = l_1^1 / L^*;\ \xi_i = l_i / L^*;$$

при $i = 2,\ 3;\ (j \neq i)$ (9)

$$\theta_{,i}^k = -(\mathrm{Bi}_{Li})^k \left[\theta^k - \varphi_{Li}^k(\xi_i;\ \tau)\right];$$
$$\xi_i = L_1^M / L^*;\ \xi_i = L_i / L^*.$$

На внутренних поверхностях, находящихся на границе k-го и k+1-го слоев ($1 \leqslant k \leqslant M-1$), условия идеального теплообмена (4) принимают форму

$$(\mu_{11})^k \theta_{,1}^k = (\mu_{11})^{k+1} \theta_{,1}^{k+1};$$
$$\theta^k(\xi_2,\ \xi_3;\ \tau) = \theta^{k+1}(\xi_2,\ \xi_3;\ \tau) \quad (10)$$
$$\text{при } \xi_1^k = L_1^k / L^* = l_1^{k+1} / L^*.$$

Таким образом, необходимо найти решение уравнений нелинейной нестационарной задачи теплопроводности (6) при начальных условиях (8) и граничных условиях (9)—(10). Нелинейность обусловлена тем, что все параметры, входящие в уравнения теплопроводности и в граничные условия, зависят от достигнутого уровня температуры.

2. Конечно-разностная аппроксимация уравнений теплопроводности по координатам

Решение задачи ищем конечно-разностным методом [5—7]. Протяженность $\left(L_1^k - L_1^{k-1}\right)/L^*$ каждого k-го слоя в направлении оси ξ_1 делится на N_1^k участков отрезками длиной Δ_1^k и точками $\xi_{1p}^k = p\Delta_1^k$ ($p = 1,\ 2,\ ...,\ N_1^k + 1$). Длины отрезков $\Delta_1^k = \left(L_1^k - L^{k-1}\right)/L^* N_1^k$. Протяженности L_j/L^* ($j = 2,\ 3$) исследуемой области в направлении осей ξ_j делятся на N_j участков отрезками Δ_j и соответствующими точками $\xi_{2q} = q\Delta_2$ ($q = 0,\ 1,\ 2,\ ...,\ N_2$) и $\xi_{3r} = r\Delta_3$ ($r = 0,\ 1,\ 2,\ ...,\ N_3$). Длины отрезков $\Delta_j = L_j / L^* N_j$ ($j = 2,\ 3$). В области исследования формируется система узловых точек $M_{pqr}(\xi_{1p},\ \xi_{2q},\ \xi_{3r})$, где $p = 1,\ ...,\ \sum_{k=1}^{M}\sum_{i=1}^{s} i$; $q = 1,\ 2,\ ...,\ N_2 + 1$; $r = 1,\ 2,\ ...,\ N_3 + 1$; $s = N_1^k + 1$.

Точки, расположенные на границе раздела слоев, имеют одинаковые координаты, но номера их различны и согласуются с их принадлежностью соседним слоям. Точки $M_{pqr}(\xi_{1p},\ \xi_{2q},\ \xi_{3r})$, где $p = N_1^k$; $q = 1,\ ...,\ N_2 + 1$; $r = 1,\ ...,\ N_3 + 1$ являются граничными точками поверхности раздела между k-м и $k + 1$-м слоем.

В любой внутренней точке исследуемой области $M_{pqr}(\xi_{1p}, \xi_{2q}, \xi_{3r})$, где $p = 2,\ ...,\ N_1^k$ ($k = 1,\ ...,\ M$); $q = 2,\ ...,\ N_2$; $r = 2,\ ...,\ N_3$, должны быть выполнены разрешающие уравнения (6) нестационарной теплопроводности, представленные в дискретной форме

$$d\theta_{pqr}^k / d\tau =$$
$$= \mathrm{Fo}_{pqr}^k \left[\left(\mu_{ij}^k\right)_{pqr} \left(\theta_{,ij}^k\right)_{pqr} + \left(\mu_i^k\right)_{pqr} \left(\theta_{,i}^k\right)\right] + \omega_{pqr}^k. \quad (11)$$

Параметры Fo_{pqr}^k, $\left(\mu_{ij}^k\right)_{pqr}$, $\left(\mu_i^k\right)_{pqr}$ в уравнении (11) различны в различных точках M_{pqr}, они зависят от уровня θ_{pqr}^k искомой температуры в текущей точке.

Если в уравнения (11) подставить аппроксимации производных со вторым порядком точности [5], то в любой внутренней точке $M_{pqr}(\xi_{1p}, \xi_{2q}, \xi_{3r})$ ($p = 2,\ ...,\ N_1^k$; $k = 1,\ ...,\ M$; $q = 2,\ ...,\ N_2$; $r = 2,\ ...,\ N_3$) можно ввести векторы-столбцы $\mathbf{V}_{pq}^k$ и $\mathbf{\Omega}_{pq}^k$ с координатными функциями + ($n_z = 1,\ ...,\ N_3 + 1$) [2]:

$$\mathbf{V}_{pq}^k = \left(\theta_{pq1}^k,\ \theta_{pq2}^k,\ ...,\ \theta_{pqN_3}^k,\ \theta_{pqN_{3+1}}^k\right)^{\mathrm{T}} = \left(\theta_{pqn_z}\right)^{\mathrm{T}},$$
$$\mathbf{\Omega}_{pq}^k = \left(\omega_{pq0}^k,\ \omega_{pq1}^k,\ ...,\ \omega_{pqN_3}^k\right)^{\mathrm{T}} = \left(\omega_{pqn_z}^k\right)^{\mathrm{T}}. \quad (12)$$

Векторы $\mathbf{V}_{pq}^k$ и $\mathbf{\Omega}_{pq}^k$ характеризуют распределение искомой температуры $\theta_{pqn_z}^k$ на пересечении произвольных плоскостей $\xi_{1p} = \mathrm{const}$, $\xi_{2q} = \mathrm{const}$ ($p = 1,\ ...,\ N_1^k + 1$; $k = 1,\ ...,\ M$; $q = 1,\ ...,\ N_2 + 1$), параллельных координатным плоскостям ξ_1, ξ_2, а также интенсивности заданных источни-

sb1016.indd 37 12.10.2016 10:34:19

ков тепла ω_{pqn_z} в этих плоскостях. Число таких векторов $\mathbf{V}_{pq}^k$ и $\mathbf{\Omega}_{pq}^k$ равно $(N_2 + 1)\sum(N_1^k + 1)$ $(k = 1, ..., M)$.

Относительно векторов $\mathbf{V}_{pq}^k$ и $\mathbf{\Omega}_{pq}^k$ уравнения теплопроводности (11) для внутренних точек исследуемой области могут быть записаны в виде

$$\begin{gathered}\partial\mathbf{V}_{pq}^k/\partial\tau = H_1^k\mathbf{V}_{p-1q-1}^k + H_2^k\mathbf{V}_{p-1q}^k - H_1^k\mathbf{V}_{p-1q+1}^k + \\ +H_3^k\mathbf{V}_{pq-1}^k + H_4^k\mathbf{V}_{pq}^k + H_5^k\mathbf{V}_{pq+1}^k - H_1^k\mathbf{V}_{p+1q-1}^k + \\ + H_6^k\mathbf{V}_{p+1q}^k + H_1^k\mathbf{V}_{p+1q+1}^k + \mathbf{\Omega}_{pq}^k; \\ p = 2, ..., N_1^k;\ k = 1, ..., M,\ q = 2, ..., N_2.\end{gathered} \tag{13}$$

Матрицы H_s $(s = 1, 2, ..., 6)$ в уравнениях (13) являются квадратными матрицами порядка $N_3 + 1$. При этом матрица H_1 является диагональной матрицей с элементами, отличными от нуля только во внутренних точках $(r = 2, ..., N_3)$:

$$H_1^k = \left\{\mathrm{Fo}_{pqr}^k\left[\left(\mu_{12}^k\right)_{pqr}\Big/\left(4\Delta_1^k\Delta_2\right)\right]\right\};\ r = 2, ..., N_3.$$

Остальные матрицы, входящие в уравнения (13), являются трехдиагональными:

$$H_s^k = \left(h_{r,r-1}^{ks};\ h_{r,r}^{ks};\ h_{r,r+1}^{ks}\right);\ r = 2, ..., N_3;\ s = 2, ..., 6.$$

Матрицы H_s характеризуются тем, что при $r = 2$ и $r = N_3$ содержат элементы $h_{2,1}^{ks}$ и h_{N_3,N_3+1}, значения которых определены в граничных точках $r = 1$ и $r = N_3 + 1$. Искомые значения этих элементов могут быть определены, если использовать условия (9) в граничных точках исследуемой области при $i = 3$. В эти условия входят производные $\partial\theta^k/\partial\xi_3$ в граничных точках. Использованы разности "вперед" и "назад" для получения аппроксимации производных с точностью до второго порядка

$$\begin{gathered}\left(\theta_{,3}^k\right)_{pq1} \approx \left(4\theta_{pq2}^k - \theta_{pq3}^k - 3\theta_{pq1}^k\right)/(2\Delta_3); \\ \left(\theta_{,3}^k\right)_{pqN_3+1} \approx \\ \approx -\left(4\theta_{pqN_3} - \theta_{pqN_3-1} - 3\theta_{pqN_3+1}^k\right)/(2\Delta_3).\end{gathered} \tag{14}$$

Сохранение одного порядка аппроксимации в дифференциальных уравнениях и граничных условиях важно [9].

Конечно-разностный аналог граничных условий (9) согласно выражениям производных (14) позволяет найти значения искомых параметров (θ_{pq1}^k, $\theta_{pqN_3+1}^k$) в граничных точках $r = 1$ и $r = N_3 + 1$ через их значения во внутренних точках. Эти соотношения имеют вид

$$\begin{gathered}\theta_{pq1}^k = \left(4/B_{pq1}\right)\theta_{pq2}^k - \left(1/B_{pq1}\right)\theta_{pq3}^k + \\ + \left[2\Delta_3\left(\mathrm{Bi}_{03}\right)_{pq1}/B_{pq1}\right]\left(\varphi_{03}\right)_{pq1}(\tau); \\ \theta_{pqN_3+1}^k = \left(4\theta_{pqN_3}^k - \theta_{pqN_3-1}^k\right)/B_{pqN_3+1} + \\ + \left[2\Delta_3\left(\mathrm{Bi}_{L3}\right)_{pqN_3+1}/B_{pqN_3+1}\right]\left(\varphi_{L3}\right)_{pqN_3+1}(\tau); \\ B_{pq1} = 3 + 2\Delta_3\left(\mathrm{Bi}_{03}\right)_{pq1}; \\ B_{pqN_3+1} = 3 + 2\Delta_3\left(\mathrm{Bi}_{L3}\right)_{pqN_3+1}.\end{gathered} \tag{15}$$

Учитывая замечания относительно структуры матриц H_s при $s = 2, ..., 6$, можно записать их элементы.

Уравнения теплопроводности (13) с использованием введенных матриц записаны относительно редуцированных векторов $\mathbf{V}_{pq}$ и $\mathbf{\Omega}_{pq}$, которые не содержат контурные элементы θ_{pq1}^k, $\theta_{pqN_3+1}^k$ и ω_{pq1}, ω_{pqN_3+3}:

$$\begin{gathered}\mathbf{V}_{pq}^k = \left(\theta_{pq2}^k,\ \theta_{pq3}^k,\ ...,\ \theta_{pqN_3}^k\right)^{\mathrm{T}} = \\ = \left(\theta_{pqn_z}^k\right)^{\mathrm{T}}\ \left(n_z = 2,\ ...,\ N_3\right); \\ \mathbf{\Omega}_{pq}^k = \left(\omega_{pq2}^6,\ \omega_{pq3}^6,\ ...,\ \omega_{pqN_3}^6\right)^{\mathrm{T}} = \left(\omega_{pqn_z}^k\right)^{\mathrm{T}}.\end{gathered} \tag{16}$$

При этом контурные значения вектора (12) могут быть найдены после решения уравнений (13) с помощью соотношений (15).

Уравнения теплопроводности (13) записаны для внутренних точек исследуемой области. Однако при $q = 2$ и $q = N_2$ в уравнения (13) входят слагаемые, определенные в граничных точках $q = 1$ и $q = N_2 + 1$. Значения этих векторов могут быть определены, если использовать условия (9) в граничных точках при $i = 2$. В эти условия входят производные $\theta_{,2}$ в граничных точках. Аппроксимация их со вторым порядком точности позволяет получить

$$\begin{gathered}\left(\mathbf{V}_{p1}^k\right)_{,2} \approx \left(4\mathbf{V}_{p2}^k - \mathbf{V}_{p3}^k - 3\mathbf{V}_{p1}^k\right)/(2\Delta_2); \\ \left(\mathbf{V}_{pN_2+1}^k\right)_{,3} \approx \\ \approx -\left(4\mathbf{V}_{pN_2}^k - \mathbf{V}_{pN_2-1}^k - 3\mathbf{V}_{pqN_2+1}^k\right)/(2\Delta_2).\end{gathered} \tag{17}$$

Конечно-разностный аналог граничных условий (9) при $i = 2$ согласно выражениям производных (17) позволяет найти значения искомых векторов в граничных точках $q = 1$ и $q = N_2 + 1$ через их значения во внутренних точках

sb1016.indd 38 12.10.2016 10:34:19

$$\mathbf{V}_{p1}^{k} = (D_{10})_p \left(4\mathbf{V}_{p2}^{k} - \mathbf{V}_{p3}^{k}\right) + (D_{20})_p\, \varphi_{02p}(\tau);$$
$$\mathbf{V}_{pN_2+1}^{k} = (D_{L1})_p \left(4\mathbf{V}_{pN_2}^{k} - \mathbf{V}_{pN_2-1}^{k}\right) + (D_{L2})_p\, \varphi_{L2}(\tau). \quad (18)$$

Диагональные матрицы $(D_{10})_p$, $(D_{20})_p$, $(D_{L1})_p$, $(D_{L2})_p$ размерности $N_3 \times N_3$ и векторы $\boldsymbol{\varphi}_{02\text{p}}(\tau)$, $\boldsymbol{\varphi}_{L2\text{p}}(\tau)$ выражены следующими соотношениями:

при $q = 1$

$$(D_{10})_p = \left[3 + 2\Delta_3 (\mathrm{Bi}_{02})_{p1r}\right]^{-1};$$

$$(D_{10})_p = \left[3 + 2\Delta_2 (\mathrm{Bi}_{02})_{p1r}\right]^{-1} \left[2\Delta_2 (\mathrm{Bi}_{02})_{p1r}\right];$$

$$\varphi_{02p}(\tau) = \left[\varphi_{02p12}(\tau),\ \varphi_{02p13}(\tau),\ \ldots,\ \varphi_{02p1N_3}(\tau)\right]^{\mathrm{T}};$$

при $q = N_2 + 1$

$$(D_{L1})_p = \left[3 + 2\Delta_3 (\mathrm{Bi}_{L2})_{pN_2+1r}\right]^{-1};$$

$$(D_{L2})_p = \left[3 + 2\Delta_2 (\mathrm{Bi}_{L2})_{pN_2+1r}\right]^{-1} \left[2\Delta_2 (\mathrm{Bi}_{L2})_{pN_2+1r}\right];$$

$$\varphi_{L2p}(\tau) = \left[\varphi_{L2p12}(\tau);\ \varphi_{L2p13}(\tau),\ \ldots,\ \varphi_{L2p1N_3}(\tau)\right]^{\mathrm{T}}.$$

Если соотношения (18) в граничных точках подставить в уравнения теплопроводности (13), то можно получить

$$\begin{aligned}
\partial \mathbf{V}_{p2}^{k}/\partial\tau = {} & \left[H_2 + 4H_1 (D_{10})_{p-1}\right]\mathbf{V}_{p-12}^{k} - \\
& -H_1\left[1 + (D_{10})_{p-1}\right]\mathbf{V}_{p-13}^{k} + \\
& +\left[H_4 + 4H_3 (D_{10})_p\right]\mathbf{V}_{p2}^{k} + \\
& +\left[H_5 - H_3 (D_{10})_p\right]\mathbf{V}_{p3}^{k} + \\
& +\left[H_6 - 4H_1 (D_{10})_{p+1}\right]\mathbf{V}_{p+12}^{k} + \\
& +H_1\left[1 + (D_{10})_{p+11}\right]\mathbf{V}_{p+13}^{k} + \boldsymbol{\Omega}_{p2}^{k} + \\
& +H_1 (D_{20})_{p-1}\, \varphi_{02p-1}(\tau) + \\
& +H_3 (D_{20})_p\, \varphi_{02p}(\tau) - H_1 (D_{20})_{p+1}\, \varphi_{02p+1}(\tau);
\end{aligned} \quad (19а)$$

$$\begin{aligned}
\partial \mathbf{V}_{pq}^{k}/\partial\tau = {} & H_1\mathbf{V}_{p-1q-1}^{k} + H_2\mathbf{V}_{p-1q}^{k} - \\
& -H_1\mathbf{V}_{p-1q+1}^{k} + H_3\mathbf{V}_{pq-1}^{k} + H_4\mathbf{V}_{pq}^{k} + \\
& +H_5\mathbf{V}_{pq+1}^{k} - H_1\mathbf{V}_{p+1q-1}^{k} + \\
& +H_6\mathbf{V}_{p+1q}^{k} + H_1\mathbf{V}_{p+1q+1}^{k} + \\
& +\boldsymbol{\Omega}_{pq}^{k};\ \ p = 2,\ \ldots,\ N_1^{k};
\end{aligned} \quad (19б)$$

$$k = 1,\ \ldots,\ M;\ \ q = 3,\ 4,\ \ldots,\ N_2 - 1;$$

$$\begin{aligned}
\partial \mathbf{V}_{pN_2}^{k}/\partial\tau = {} & H_1\left[1 + (D_{L1})_{p-1}\right]\mathbf{V}_{p-1N_2-1}^{k} + \\
& +\left[H_2 - 4H_1 (D_{L1})_{p-1}\right]\mathbf{V}_{p-1N_2}^{k} + \\
& +\left[H_3 - H_5 (D_{L1})_p\right]\mathbf{V}_{pN_2-1}^{k} + \\
& +\left[H_4 + 4H_5 (D_{L1})_p\right]\mathbf{V}_{pN_2}^{k} - \\
& -H_1\left[1 + (D_{L1})_{p+1}\right]\mathbf{V}_{p+1N_2-1}^{k} + \\
& +\left[H_6 + 4H_1 (D_{L1})_{p+1}\right]\mathbf{V}_{p+1N_2}^{k} + \boldsymbol{\Omega}_{pN_2}^{k} - \\
& -H_1 (D_{L2})_{p-1}\, \varphi_{L2p-1}(\tau) + \\
& +H_5 (D_{L2})_p\, \varphi_{L2p}(\tau) + H_1 (D_{L2})_{p+1}\, \varphi_{L2p+1}(\tau).
\end{aligned} \quad (19в)$$

В каждом слое k ($k = 1, 2, \ldots, M$) целесообразно рассмотреть векторы

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}_p^{k} = {} & \left[\mathbf{V}_{p2}^{k},\ \mathbf{V}_{p3}^{k},\ \ldots,\ \mathbf{V}_{pq-1}^{k},\ \mathbf{V}_{pq}^{k},\ \mathbf{V}_{pq+1}^{k},\ \ldots,\ \mathbf{V}_{pN_2}^{k}\right]^{\mathrm{T}}; \\
\boldsymbol{\Theta}_p^{k} = {} & \left[\boldsymbol{\Omega}_{p2}^{k*},\ \boldsymbol{\Omega}_{p3}^{k},\ \ldots,\ \boldsymbol{\Omega}_{pq-1}^{k},\right. \\
& \left.\boldsymbol{\Omega}_{pq}^{k},\ \boldsymbol{\Omega}_{pq+1}^{k},\ \ldots,\ \boldsymbol{\Omega}_{pN_2-1}^{k},\ \boldsymbol{\Omega}_{pN_2}^{k*}\right]^{\mathrm{T}}
\end{aligned} \quad (20)$$

с векторными компонентами $\mathbf{V}_{pq}^{k}$, уточненными крайними компонентами вектора $\boldsymbol{\Omega}_{pq}^{k}$.

Относительно векторов $\mathbf{U}_p^{k}$ уравнения теплопроводности (13) для внутренних точек ($p = 2, \ldots, N_1^{k}$) произвольного k слоя записываются в виде

$$\partial \mathbf{U}_p^{k}/\partial\tau = A\mathbf{U}_{p-1}^{k} + B\mathbf{U}_p^{k} + C\mathbf{U}_p^{k} + \boldsymbol{\Theta}_p^{k}. \quad (21)$$

Матрицы A, B, C являются трехдиагональными размерности $(N_2 - 1)\times(N_2 - 1)$ с квадратными блоками для произвольного k-слоя

$$A = \begin{bmatrix}
H_2 + 4H_1 (D_{10})_{p-1} & -H_1 - H_1 (D_{10})_{p-1} & 0 & 0 & 0 \\
H_1 & H_2 & H_1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & H_1 + H_1 (D_{L1})_{p-1} & H_2 - 4H_1 (D_{L1})_{p-1}
\end{bmatrix};$$

sb1016.indd 39 12.10.2016 10:34:20

$$B = \begin{bmatrix} H_4 + 4H_3(D_{10})_p & H_5 - H_3(D_{10})_p & 0 & 0 & 0 \\ H_3 & H_4 & H_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_3 - H_5(D_{L1})_p & H_4 + 4H_5(D_{L1})_p \end{bmatrix}; \quad (22)$$

$$C = \begin{bmatrix} H_6 - 4H_1(D_{10})_{p+1} & H_1 - H_1(D_{10})_{p+1} & 0 & 0 & 0 \\ -H_1 & H_6 & H_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\left(H_1 + H_1(D_{L1})_{p+1}\right) & H_6 - 4H_1(D_{L1})_{p+1} \end{bmatrix}.$$

Векторные уравнения (21) решены при граничных условиях (9) при $i = 1$ и (10). На наружных поверхностях первого и последнего M слоев условия конвективного теплообмена (9) записаны в виде

при $\xi_1^1 = 0$

$$\mathbf{U}_{1,1}^1 = G_{01}^1\left(\mathbf{U}_1^1 - \Phi_{01}\right); \quad (23а)$$

при $\xi_1^M = \Lambda_1^M = L_1^M / L^*$

$$U_{N_1 k+1,1}^M = -G_{L1}^M\left(\mathbf{U}_{N_1 k+1}^M - \Phi_{L1}\right), \quad (23б)$$

где G_{01}^1 и G_{L1}^M — блочные диагональные матрицы с числом блоков $N_2 - 1$; Φ_{01}, Φ_{L1} — векторы.

Каждый блок является диагональной матрицей размерности $(N_3 - 1)\times(N_3 - 1)$. Элементами диагональных матриц являются значения параметров Био Bi_{qr} ($k = 1$ и $k = M$) в точке $\xi_2 = q\Delta_2$ и $\xi_3 = r\,\Delta_1$ поверхности $\xi_1^1 = 0$ и $\xi_1^M = \Lambda_1^M + L_1^M / L^*$ соответственно.

На внутренних поверхностях контактной границы k-го и k+1-го слоев при идеальном теплообмене условия (10) принимают форму соотношений

$$\mathbf{U}_{N_1^k+1,1}^k = G_{01}^{k+1}\mathbf{U}_{1,1}^{k+1}; \quad (24)$$

$$\mathbf{U}_{N_1^k+1}^k = U_1^{k+1} \text{ при } \xi_1^k = \Lambda_1^k = L_1^k / L^*;\ 1 \leqslant k \leqslant M - 1.$$

Блочная матрица G_{01}^{k+1} по структуре совпадает с описанными выше матрицами G_{01}^1 и G_{L1}^M. Элементами диагональных матриц размерности $(N_3 - 1)\times(N_3 - 1)$ являются значения отношения коэффициентов теплопроводности в соседних слоях $(\mu_{11})_{1qr}^{k+1} / (\mu_{11})_{N_1^k+1qr}^k$.

3. Конечно-разностная аппроксимация уравнений теплопроводности по времени

При конечно-разностной аппроксимации уравнений (21) по времени непрерывный безразмерный интервал времени τ представляют дискретными значениями $\tau_n = n\Delta\tau$, где $n = 0, 1, 2, ...$; $\Delta\tau$ — шаг по времени. Уравнения теплопроводности (21) интегрируют по времени на одном шаге от τ_n до τ_{n+1} и представляют при использовании неявной расчетной схемы с весом z в виде

$$\begin{gathered} \left(\mathbf{U}_p^k\right)^{n+1} - z\Delta\tau\times \\ \times\left(A_p\mathbf{U}_{p-1}^k + B_p\mathbf{U}_p^k + C_p\mathbf{U}_{p+1}^k + \mathbf{\Theta}_p^k\right)^{n+1} = \\ = \left(\mathbf{U}_p^k\right)^n + (1 - z)\Delta\tau\times \\ \times\left(A_p\mathbf{U}_{p-1}^k + B_p\mathbf{U}_p^k + C_p\mathbf{U}_{p+1}^k + \mathbf{\Theta}_p^k\right)^n. \end{gathered} \quad (25)$$

Уравнения теплопроводности (25) позволяют найти температуру $\left(\mathbf{U}_p^k\right)^{n+1}$ в момент времени τ_{n+1}, если известна $\left(\mathbf{U}_p^k\right)^{n+1}$ в предыдущий момент времени τ_n, внутренние источники тепла $\mathbf{\Theta}_p^k$ и выполнены соответствующие граничные условия. При $z = 0$ уравнения теплопроводности (25) представляют собой явную расчетную схему, а при $z \neq 0$ — неявную. При $z = 0{,}5$ соотношение (25) аналогично дискретному уравнению Крэнка—Николсона [5].

Уравнения (25) существенно нелинейны. Нелинейность обусловлена зависимостью теплофизических характеристик от искомой температуры $\left(\mathbf{U}_p^k\right)^{n+1}$. Теплофизические характеристики на одном шаге $\Delta\tau$ по времени претерпевают незначительные изменения. Степень изменения теплофизических характеристик регулируют выбором шага $\Delta\tau$ по времени. При перечисленных условиях неизвестные значения параметров среды, входящие в левую часть уравнений (25), в текущий момент времени τ_{n+1} заменяют их значениями в момент времени τ_n. При этом уравнения теплопроводности (25) локально линеаризуются, а их решения существенно упрощаются. Разрешающие уравнения с учетом настоящих замечаний получены из уравнений (25):

$$\begin{gathered} P_p^n\left(\mathbf{U}_{p-1}^k\right)^{n+1} + R_p^n\left(\mathbf{U}_p^k\right)^{n+1} + S_p^n\left(\mathbf{U}_{p+1}^k\right)^{n+1} = \\ = \left(\mathbf{Q}_p^k\right)^n,\ \ p = 2,\ ...,\ N_1^k. \end{gathered} \quad (26)$$

sb1016.indd 40 12.10.2016 10:34:20

Здесь введены обозначения

$$P_p^n = -z\Delta\tau A_p^n;\ R_p^n = E - z\Delta\tau B_p^n;\ S_p^n = -z\Delta\tau C_p^n;$$
$$\left(\mathbf{Q}_p^k\right)^n = z\Delta\tau\left(\Theta_p^k\right)^{n+1} + (1-z)\Delta\tau\left(A_p\mathbf{U}_{p-1}^k\right)^n + \left[E + (1-z)\Delta\tau\left(B_p\right)^n\right]\left(\mathbf{U}_p^k\right)^n + (1-z)\Delta\tau\left(C_p\mathbf{U}_{p+1}^k\right)^n + (1-z)\Delta\tau\left(\mathbf{\Theta}_p^k\right)^n, \quad (27)$$

где E — единичная матрица.

4. Прямая и обратная прогонка — метод решения уравнений трехмерной теплопроводности в слоистых средах

Для решения дискретных уравнений (26) с удовлетворением граничных условий (23), (24) могут быть применены различные методы. Решения уравнений теплопроводности найдем методом прямой и обратной прогонки [8].

Прямая прогонка. В соответствии с приемами метода прямой и обратной прогонки [5—7] при их обобщении на трехмерный случай предполагается, что искомый тензор $\left(\mathbf{U}_{p-1}^k\right)^{n+1}$ в сечении $p-1$ любого слоя k линейно зависит от неизвестного тензора $\left(\mathbf{U}_p^k\right)^{n+1}$ в следующем сечении p слоя k

$$\left(\mathbf{U}_{p-1}^k\right)^{n+1} = X_p^n\left(\mathbf{U}_p^k\right)^{n+1} + \mathbf{Y}_p^n;\ p = 2, 3, \ldots, N_1^k, \quad (28)$$

где X_p^n — квадратная блочная матрица с независящими от искомого вектора $\mathbf{U}_p^k$ элементами;

$\mathbf{Y}_p^n$ — тензор с векторными координатными функциями.

Если зависимости (28) подставить в основное уравнение (26), то получим рекуррентные соотношения

$$\left(\mathbf{U}_p^k\right)^{n+1} = X_{p+1}^n\left(\mathbf{U}_{p+1}^k\right)^{n+1} + \mathbf{Y}_{p+1}^n;\ p = 2, \ldots, N_1^k. \quad (29)$$

В них введены обозначения

$$X_{p+1}^n = -\left(R_p^n + P_p^n X_p^n\right)^{-1} S_p^n;$$
$$\mathbf{Y}_{p+1}^n = \left(R_p^n + P_p^n X_{pi}^n\right)^{-1}\left(\left(\mathbf{Q}_p^k\right)^n - P_p^n\mathbf{Y}_p^n\right);\ p = 2, \ldots, N_1. \quad (30)$$

Если матрица X_p^n и вектор $\mathbf{Y}_p^n$ найдены в сечении p, то с помощью преобразований (30) матрица X_{p+1}^n и тензор $\mathbf{Y}_{p+1}^n$ определены в следующем сечении $p+1$. Для установления начальных значений матрицы X_2^n и тензора Y_2^n в любом слое следует использовать уравнение теплопроводности (26) в первом внутреннем сечении ($p = 2$) текущего слоя k и граничные условия (23а) при $k = 1$ или условия (24) при $1 < k < M$.

Граничные условия (23) и (24) содержат производные в первом сечении $\xi_1^k = l_1^{k+1}/L^*$ k-го слоя и в последнем сечении $\xi_1^k = L_1^k/L^*$ предыдущего слоя. Аппроксимация производных со вторым порядком точности позволяет получить

$$\left(\mathbf{U}_1^k\right)_{,1} = \left(4\mathbf{U}_2^k - \mathbf{U}_3^k - 3\mathbf{U}_1^k\right)/\left(2\Delta_1^k\right); \quad (31а)$$

$$\left(\mathbf{U}_{N_1^k+1}^k\right)_{,1} = -\left(4\mathbf{U}_{N_1^k}^k - \mathbf{U}_{N_1^k-1}^k - 3\mathbf{U}_{N_1^{k+1}}^k\right)/\left(2D_1^k\right). \quad (31б)$$

Если зависимость (31а) подставить в граничное условие (23а) при $k = 1$, то получим выражение

$$\mathbf{U}_1^1 = \left(3E + 2\Delta_1^1 G_{01}^1\right)^{-1}\left(4\mathbf{U}_2^1 - \mathbf{U}_3^1 + 2\Delta_1^1 G_{01}^1\Phi_{01}\right). \quad (32)$$

Оно связывает значения искомых векторов $\mathbf{U}_p^1$ в трех соседних узловых сечениях ($p = 1$, $p = 2$ и $p = 3$). Если соотношение (32) подставить в уравнение (26) во внутреннем сечении $p = 2$, то получим

$$\left(\mathbf{U}_2^1\right)^{n+1} = X_3^n\left(\mathbf{U}_3^1\right)^{n+1}\mathbf{Y}_3^n, \quad (33)$$

где введены обозначения

$$X_3^n = \left[R_2^n + 4P_2^n\left(3E + 2\Delta_1^1 G_{01}^1\right)^{-1}\right]^{-1} \times \left[S_2^n - P_2^n\left(3E + 2\Delta_1^1 G_{01}^1\right)^{-1}\right]; \quad (33а)$$

$$\mathbf{Y}_3^n = \left[R_2^n + 4P_2^n\left(3E + 2\Delta_1^1 G_{01}^1\right)^{-1}\right]^{-1} \times \left[\left(\mathbf{Q}_2^k\right)^n - P_2^n\left(3E + 2\Delta_1^1 G_{01}^1\right)^{-1} 2\Delta_1^1 G_{01}^1\Phi_{01}^{n+1}\right]. \quad (33б)$$

Соотношениями (33) определены матрица X_3^n и вектор $\mathbf{Y}_3^n$ в первом внутреннем сечении $p = 2$ и с их помощью рекуррентные соотношения (30) позволяют найти все последующие матрицы X_{p+1}^n и тензоры $\mathbf{Y}_{p+1}^n$ в сечениях $p = 3, 4, \ldots, N_1^1 + 1$. Этот процесс вычислений называется прямой прогонкой.

Обратная прогонка. В последнем сечении первого слоя $k = 1$ многослойного тела необходимо выполнить граничные условия (24), а если тело однослойное, то — условие (23б). В любом случае в граничные условия входят производные в последнем сечении текущего слоя. Их находят с помощью соотношений (31б), куда одновременно входят значения неизвестных в трех узловых сечениях, соседних с последним $p = N_1^k + 1$. Если использовать выражения

$$\left(\mathbf{U}_{N_1^k-1}^k\right)^{n+1} = X_{N_1^k}^n\left(\mathbf{U}_{N_1^k}^k\right)^{n+1} + Y_{N_1^k}^k;$$
$$\left(\mathbf{U}_{N_1^k}^k\right)^{n+1} = X_{N_1^k+1}^n\left(\mathbf{U}_{N_1^k+1}^k\right)^{n+1} + Y_{N_1^k+1}^n;$$

sb1016.indd 41 12.10.2016 10:34:21

$$\left(\mathbf{U}^k_{N_1^k-1}\right)^{n+1} = X^n_{N_1^k} X^n_{N_1^k+1}\left(\mathbf{U}^k_{N_1^k+1}\right)^{n+1} + \\ + X^n_{N_1^k+1} Y^n_{N_1^k+1} + Y^n_{N_1^k},$$

то производная (31б) может быть записана в удобном виде

$$\left(\mathbf{U}^k_{N_1^k+1}\right)_{,1} = \left\{\left[3E - \left(4E - X^n_{N_1^k}\right) X^n_{N_1^k+1}\right]\times \right. \\ \left.\times\left(\mathbf{U}^k_{N_1^k+1}\right)^{n+1} - \left(4E - X^n_{N_1^k}\right)\mathbf{Y}^n_{N_1^k+1} + Y^n_{N_1^k}\right\} / \left(2\Delta_1^k\right). \quad (34)$$

Последнее сечение последнего слоя. Если рассматривать последнее сечение $p = N_1^k + 1$ последнего слоя $k = M$, то найденное значение производной (34) в этом сечении подставляют в граничное условие (23б). Это позволяет получить распределение $\left(\mathbf{U}^M_{N_1^k+1}\right)^{n+1}$ искомой температуры на наружной поверхности $\xi_1^M = \Lambda_1^M = L_1^M / L^*$

$$\left(\mathbf{U}^M_{N_1^k+1}\right)^{n+1} = \\ = \left[2\Delta_1^k G^M_{L1} + 3E - \left(4E - X^n_{N_1^k}\right) X^n_{N_1^k+1}\right]^{-1}\times \quad (35) \\ \times\left[\left(2\Delta_1^k\right) G^M_{L1}\Phi_{L1} + \left(4E - X^n_{N_1^k}\right)\mathbf{Y}^n_{N_1^k+1} - \mathbf{Y}^n_{N_1^k}\right].$$

Последнее сечение промежуточного слоя. В последнем сечении промежуточного слоя должны быть выполнены условия (24). На границе раздела слоев температуры на контактных поверхностях соседних слоев равны:

$$\left(\mathbf{U}^M_{N_1^k+1}\right) = \mathbf{U}_1^{k+1} \quad (36а)$$

при $\xi_1^k = \Lambda_1^k = L_1^k / L^* = l_1^{k+1} / L^*;\ 1 \leqslant k \leqslant M - 1.$

В условиях, связывающих градиенты температур, производные находят из соотношений (34)

$$\mathbf{U}_1^{k+1} = \\ = \left[3\left(\Delta_1^k / \Delta_1^{k+1}\right) G_{01}^{k+1} + 3E - \left(4 - X_{N_1^k}\right) X_{N_1^k+1}\right]^{-1}\times \\ \times\left[\left(\Delta_1^k / \Delta_1^{k+1}\right) G_{01}^{k+1}\left(4\mathbf{U}_2^{k+1} - \mathbf{U}_3^{k+1}\right) + \right. \quad (36б) \\ \left. + \left(4E - X_{N_1^k}\right)\mathbf{Y}_{N_1^k+1} - \mathbf{Y}_{N_1^k}\right].$$

Соотношениями (36) неизвестные в последнем сечении k-го слоя и в первой точке k+1-го слоя выражены через их значения во внутренних точках k+1-го слоя. Используя соотношения (36б) и уравнение теплопроводности во втором сечении ($p = 2$) k+1-го слоя, для k+1-го слоя, получаем выражения, аналогичные равенствам (32), которые позволяют продолжить определение блочной матрицы X_3^n и вектора $\mathbf{Y}_3^n$ для следующего слоя и с последующим их определением по рекуррентным формулам (30) в любом внутреннем сечении k+1-го слоя.

Для внутренних контактных поверхностей при идеальном теплообмене получены разрешающие уравнения, связывающие распределения температур при подходе к контактной граничной поверхности с различных сторон, которые полностью определяют этап прямой прогонки для многослойного тела, заканчивающийся установлением неизвестных на последней поверхности последнего слоя (35).

Установленные с помощью соотношений (35) значения температур на поверхности $\xi_1^M = \Lambda_1^M = L_1^M / L^*$ исследуемой области позволяют перейти к завершающему этапу решения поставленной задачи — к обратной прогонке. На стадии обратной прогонки с помощью соотношения (29) и найденного по формуле (35) распределения температуры $\left(\mathbf{U}^M_{N_1^k+1}\right)^{n+1}$ последовательно находят неизвестные $\left(\mathbf{U}_p^M\right)^{n+1}$ в текущем узловом сечении p по их значениям $\left(\mathbf{U}^M_{p+1}\right)^{n+1}$ в сечении $p + 1$ в слое M. В первом сечении слоя температуру находят по формуле (31б). В последнем сечении предыдущего слоя температуру определяют из равенств (31а). Это позволяет провести операцию обратной прогонки в следующем $M - 1$-слое. Так продолжается до первого слоя, в котором распределения неизвестной температуры находят из соотношения (32). Этим завершается процесс решения краевой задачи уравнений теплопроводности в многослойной анизотропной среде.

Для решения нестационарных задач теплопроводности с использованием описанного метода разработана вычислительная программа на языке Фортран-7. Она позволяет получить численное решение широкого класса пространственных задач нестационарной теплопроводности. Опыт применения расчетной программы показывает, что наибольшее время требуется для вычисления обратных блочных матриц. Поэтому с учетом структуры строения матриц разработан оптимизированный алгоритм их обращения.

В ходе выполнения расчетных исследований использовали обобщенное на анизотропные тела условие устойчивости разработанной конечно-разностной модели [9, 10]:

$$\Delta_\tau \leqslant \left[\left(\Delta_1^k\right)^2 / \mu_{11}^k + \left(\Delta_2\right)^2 / \mu_{22}^k + \left(\Delta_3\right)^2 / \mu_{33}^k\right] \Big/ 2\left(\mathrm{Fo}^k\right).$$

sb1016.indd 42 12.10.2016 10:34:21

5. Постановка задачи

Типовой отсек камеры сгорания многослойного цилиндрического двигателя с щелевым зарядом твердого топлива состоит из относительно тонкостенного несущего корпуса, адгезионного слоя, слоя теплоизолирующего материала (ТЗП) и твердого топлива [16]. Щели в теле твердого топлива служат для обеспечения необходимого режима горения. Геометрически он выполнен в виде периодически расположенных осевых разрезов на внутренней поверхности заряда.

Применительно к конструкции РДТТ рассматривали пятислойный цилиндр с периодическим распределением n щелей (осевых разрезов) в первом (внутреннем) слое. Периодическое расположение щелей определяет периодичность распределения температуры T по окружной координате φ, что позволяет рассматривать только часть цилиндра, заключенную в области

$$r_0^k \leqslant r \leqslant R^k;\ |\varphi| = \pi/n;\ l_z \leqslant z \leqslant L_z\ \left(k = 1,\ \ldots,\ 5\right). \quad (37)$$

Второй слой $\left(r_0^2 = R^1 \leqslant r \leqslant R^2\right)$ начинается от вершины разреза и является наиболее протяженным. При этом 1-й и 2-й слои выполнены из одного материала. Далее расположены относительно тонкие теплозащитный ($k = 3$) и адгезионный ($k = 4$) слои, пятый слой является силовым.

Для исследования характера распределения температуры используют уравнения нестационарной теплопроводности (1) в цилиндрической системе координат. На внутренней цилиндрической поверхности $r = r_0^1$ температуру находят из условия конвективного теплообмена

$$\text{при } t \leqslant t_0\ \ \lambda_{rr} T_{,r}^1 = \left(\alpha_{01}^1\right)\left\{T^1 - T_0 - (t/t_0)\times \right.$$
$$\left.\times\left[T_{z0} - \left(T_{z0} - T_{zL}\right)\left(z - l_z\right)/\left(L_z - l_z\right)\right]\right\}; \quad (38а)$$

$$\text{при } t_0 \leqslant t\ \ \lambda_{rr}^1 T_{,r}^1 = \left(\alpha_{01}^1\right)\left\{T^1 - T_0 - \right.$$
$$\left.-\left[T_{z0}\left(T_{z0} - T_{zL}\right)\left(z - l_z\right)/\left(L_z - l_z\right)\right]\right\}, \quad (38б)$$

где T_{z0} и T_{zL} — максимальные значения температуры в области переднего ($z = l_z$) и заднего ($z = L_z$) торца заряда твердого топлива;

t_0 — время выхода температуры на максимальные значения.

На наружной цилиндрической поверхности $r = R^M$ задан конвективный теплообмен с окружающей средой, температура которой постоянна и равна T_0:

$$\lambda_{rr}^M T_{,r}^M = -\left(\alpha_{L1}^M\right)\left(T^M - T_0\right). \quad (39)$$

На контактных поверхностях смежных слоев принимаются условия идеального теплообмена

$$\lambda_{rr}^k T_{,r}^k = \lambda_{rr}^{k+1} T^{k+1};\ T_{,r}^k = T^{k+1}\ \text{при}\ r = R^k = r_0^{k+1}. \quad (40)$$

В области разреза заряда на поверхностях $|\varphi| = \pi/n$ в пределах первого слоя принимаем, что теплообмен с внешней средой является конвективным

$$\text{при } t \leqslant t_0\ \ \lambda_{\varphi\varphi}^1 T_{,\varphi}^1 = \left(\alpha_\varphi^1\right)\left\{T^1 - T_0 - (t/t_0)\times \right.$$
$$\left.\times\left[T_{z0} - \left(T_{zL} - T_{z0}\right)\left(z - l_z\right)/\left(L_z - l_z\right)\right]\right\}; \quad (41а)$$

$$\text{при } t_0 \leqslant t\ \ \lambda_{\varphi\varphi}^1 T_{,\varphi}^1 = \left(\alpha_\varphi^1\right)\left\{T^1 - T_0 - \right.$$
$$\left.-\left[T_{z0} - \left(T_{zL} - T_{z0}\right)\left(z - l_z\right)/\left(L_z - l_z\right)\right]\right\}. \quad (41б)$$

На боковых поверхностях $|\varphi| = \pi/n$ всех других слоев теплообмен считаем запрещенным:

$$T_{,\varphi}^k = 0\ \ \left(k = 2,\ 3,\ 4,\ 5\right). \quad (41в)$$

Последнее условие предполагает, что в этих слоях температуры при переходе от одного сектора по окружности к другому равны.

На торцевых поверхностях $z = l_z = 0$ и $z = L_z$ реализуется конвективный теплообмен с окружающей средой и выполнены следующие условия:

$$\text{при } z = l_z = 0$$
$$\lambda_{zz}^k T_{,z}^k = \left(\alpha_{03}^k\right)\left[T^k - T_0 - (t/t_0)T_{z0}\right]; \quad (42а)$$

$$\text{при } z = L_z$$
$$\lambda_{zz}^k T_{,z}^k = -\left(\alpha_{L3}^k\right)\left[T^k - T_0 - (t/t_0)T_{zL}\right]. \quad (42б)$$

В начальном состоянии температуру в слоях изучаемого тела считаем однородной и совпадающей с температурой окружающей среды T_0:

$$T^k(r, \varphi z;\ 0) = T_0\ \text{при}\ t = 0. \quad (43)$$

Находим в области (37) решение уравнений (1) при граничных (38)—(42) и начальных условиях (43).

Решение строим численно обобщенным на пространственный случай методом прямой и обратной прогонки относительно безразмерной температуры θ^k в относительной системе координат и времени. В качестве безразмерных величин используем следующие параметры:

$$\xi = r/R^M;\ \varphi = \varphi;\ \eta = z/R^M;$$
$$\tau = t/t_0;\ \theta^k = (T^k - T_0)/T_{\max}. \quad (44)$$

В качестве параметра R^M выбрано максимальное значение протяженности заряда в радиаль-

sb1016.indd 43 12.10.2016 10:34:21

ном или осевом направлениях R^{*M}, а в качестве $T_{\max}$ — значение температуры T_{zL} на торцевой поверхности $z = L_z$.

Решаем уравнения (6) с параметрами (7), а граничные (38)—(42) и начальные (43) условия преобразуются в следующие соотношения:

при $\tau \leqslant 1$

$$\theta^1_{,\xi} = \mathrm{Bi}^1_{01}\left[\theta^1 - \theta_{z0} - \tau\eta\left(\theta_{zL} - \theta_{z0}\right)R^{*M}/L_z\right]; \quad (45а)$$

при $\tau > 1$

$$\theta^1_{,\xi} = \mathrm{Bi}^1_{L1}\left[\theta^1 - \theta_{z0} - \tau\eta\left(\theta_{zL} - \theta_{z0}\right)R^{*M}/L_z\right]. \quad (45б)$$

Соотношения (45) выполняются при $\xi = \xi_0 = r_0^r/R^{*M}$ и

$$\mathrm{Bi}^1_{01} = \alpha^1_{01}R^M/\lambda^1_{rr};\ \theta_{z0} = \left(T_{z0} - T_0\right)/T_{zL};\quad \theta_{zL} = \left(T_{zL} - T_0\right)/T_{zL}. \quad (46)$$

На наружной цилиндрической поверхности $\xi = 1$ в любой момент времени должны быть удовлетворены условия

$$\theta^M_{,\xi} = -\mathrm{Bi}^M_{L1}\theta^M;\ \mathrm{Bi}^M_{L1} = \alpha^M_{L1}R^M/\lambda^M_{rr}. \quad (47)$$

На поверхностях $|\varphi| = \pi/n$ реализуется теплообмен и должны быть удовлетворены условия

$$\theta^1_{,\varphi} = \mathrm{Bi}^1_{\varphi}\left[\theta^1 - \theta_{z0} - \tau\eta\left(\theta_{zL} - \theta_{z0}\right)R^{*M}/L_z\right]; \quad (48)$$

в пределах первого слоя и в пределах других слоев

$$\theta^k_{,\varphi} = 0\ \ (k = 2, 3, 4, 5),$$

где

$$\mathrm{Bi}^1_{\varphi} = \alpha^1_{\varphi}R^M/\lambda^1_{\varphi\varphi}.$$

На торцевых поверхностях $\eta = 0$ и $\eta = L_z/R^M$ необходимо удовлетворить условиям

$$\theta^k_{,\eta} = \mathrm{Bi}^k_{03}\left(\theta^k - \theta_{z0}\right);\ \mathrm{Bi}^k_{03} = \alpha^k_{03}R^M/\lambda^k_{zz}; \quad (49а)$$

$$\theta^k_{,\eta} = -\mathrm{Bi}^k_{L3}\left(\theta^k - \theta_{zL}\right);\ \mathrm{Bi}^k_{L3} = \alpha^k_{L3}R^M/\lambda^k_{zz}. \quad (49б)$$

Начальные условия принимают вид

$$\theta^k(\xi, \varphi, \eta, 0) = 0 \quad (50)$$

Решение уравнений (6) при начальных (50) и граничных (45)—(49) условиях находят конечно-разностным методом с применением прямой и обратной прогонки. Граничные условия (48) на поверхностях $|\varphi| = \pi/n$ являются разрывными. Разрыв имеет место при переходе от первого ко второму слою, несмотря на то, что эти слои выполнены из одного материала.

В расчетах принято, что число n щелей равно 8. Рассматривали пространство $0 \leqslant \varphi \leqslant \pi/16$, оно разделено на 4 участка. Длина заряда $L_z = 1000$ мм, а $N_z = 21$. Радиальная протяженность слоев, число отрезков, на которые они делятся, и материалы, из которых выполнены отдельные слои, представлены в табл. 1. Температурное состояние отсека камеры сгорания РДТТ при известных граничных и начальных условиях зависит от переменных теплофизических характеристик каждого слоя. Граничные условия, которые обусловливают взаимодействие тела с окружающей средой, задаются в виде температуры окружающей среды T_0 и законов теплообмена между телом и окружающей средой. Теплообмен в РДТТ обусловлен [1]:

— зависимостью характеристик теплообмена от времени (нестационарность теплообмена), которая вызывается изменением геометрической формы и размеров проточной части в результате горения в камере сгорания;

— сложной динамикой потока газа;

— непрерывным газообразованием с поверхности горения твердотопливного заряда;

— влиянием конденсированных частиц;

— химическим взаимодействием между продуктами сгорания и материалами твердого топлива, ТЗП и ЗКС.

В проведенных расчетах коэффициенты теплообмена приняты по табл. 2.

На рис. 1 приведено распределение температуры в радиальном направлении в сечении $\varphi = 3\Delta\varphi$ (сечение, близкое к щели); $\eta = 11\Delta\eta$ (среднее по длине заряда сечение). В течение 5000 шагов по времени заряд в этом сечении практически не прогревается. При этом на первых 4000 шагах температура горения постепенно (линейно) растет (линия *1*). Каждый промежуток между приведенными результатами соответствует 500 шагам по времени. В промежутке времени от 4000 до 5000 температура на контуре горения сохраняется на уровне достигнутого (линия *2*).

На рис. 2 приведено распределение температуры в окружном направлении в сечении $r = 3\Delta r^1$ первого слоя (рис. 2, *а*) и в сечение $r = 2\Delta r^2$ второго слоя (рис. 2, *б*); по оси z в среднем по длине заряда сечения $\eta = 11\Delta\eta$. На правом конце первого слоя на поверхности щели $\varphi = 4\Delta\varphi$ температура соответствует заданной температуре окружающей среды в текущем сечении $\eta = 11\Delta\eta$. Во втором слое в первой внутренней точке $r = 2\Delta r^2$ на правой и левой границах сечения выполняются условия свободного тепло-

sb1016.indd 44 12.10.2016 10:34:22

Таблица 1

Теплофизическая характеристика материалов отдельных слоев и зависимость от температуры

Материал	Температура, °С	Характеристики		
		ρ, г/см^3	λ, Вт/(м·К)	C_ε, Дж/(кг·К)
Заряд твердого топлива	22	1,7	0,6	1700
Слой 1. $50 \leqslant r \leqslant 200$, $N_r^1 = 7$	1500	—	0,582	1950
Слой 2. $200 \leqslant r \leqslant 470$, $N_r^2 = 12$	2200	—	0,560	2130
Слой 3. Теплозащитный материал (ТЗП). Фенольное связующее с кремнеземной тканью [1].	20	2,27	0,27	1050
$470 \leqslant r \leqslant 480$, $N_r^3 = 4$	500	—	0,25	1150
Слой 4. Защитно-крепящий слой (ЗКС)	20	1,2	8,8	837
$480 \leqslant r \leqslant 490$, $N_r^4 = 4$	220	—	8,0	959
Слой 5. Силовой корпус. Органопластик [2].	−50	1,45	2,62/0,25*	840
$490 \leqslant r \leqslant 500$, $N_r^5 = 4$	−25	—	2,84/0,27	930
	0	—	3,05/0,33	1020
	25	—	3,22/0,35	1120
	50	—	3,31/0,37	1190
	75	—	3,34/0,39	1300

* В числителе приведено значение коэффициента теплопроводности вдоль основы ткани, в знаменателе — вдоль утка.

Таблица 2

Коэффициенты теплообмена в зависимости от температуры

Коэффициенты теплообмена	Температура, °С		
	22	1500	2200
α_{0r}, α_{Lr}	50,43	41,97	40,43
$\alpha_{0\varphi}$, $\alpha_{L\varphi}$			
α_{0z}, α_{Lz}			

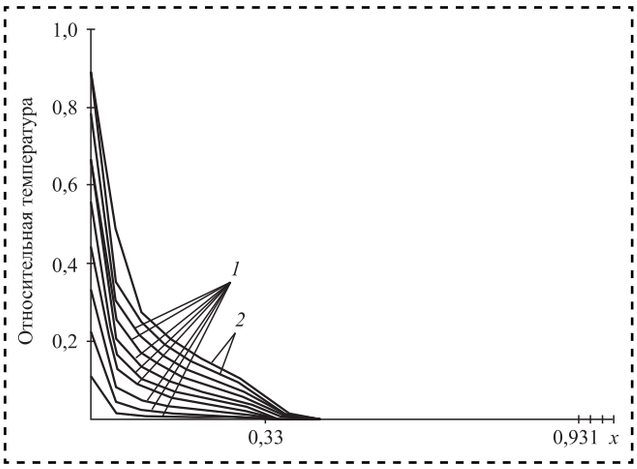


Рис. 1. Распределение температуры по радиусу заряда твердого топлива в сечении φ = 3Δφ, η = 11Δη:
1 — на стадии роста температуры; *2* — при выдержке температуры

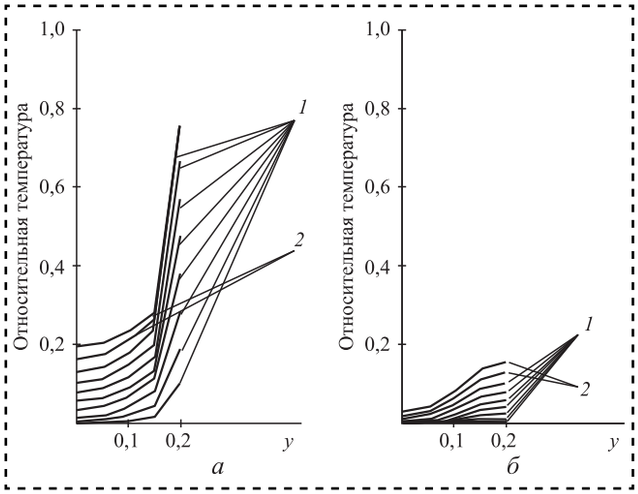


Рис. 2. Распределение температуры по окружной координате в заряде твердого топлива в сечении $r = 3\Delta r^1$, η = 11Δη в 1-м слое (*а*) и в сечении $r = 2\Delta r^2$, η = 11Δη во 2-м слое (*б*):
1 — на стадии роста температуры; *2* — при выдержке температуры

обмена (48в), явно обозначено влияние близости радиального конца щели.

Таким образом, численно решена задача, в которой граничные условия резко меняются при переходе от слоя к слою.

На рис. 3 приведено распределение температуры в осевом направлении в сечении $r = 2\Delta r^1$ пер-

sb1016.indd 45 12.10.2016 10:34:22

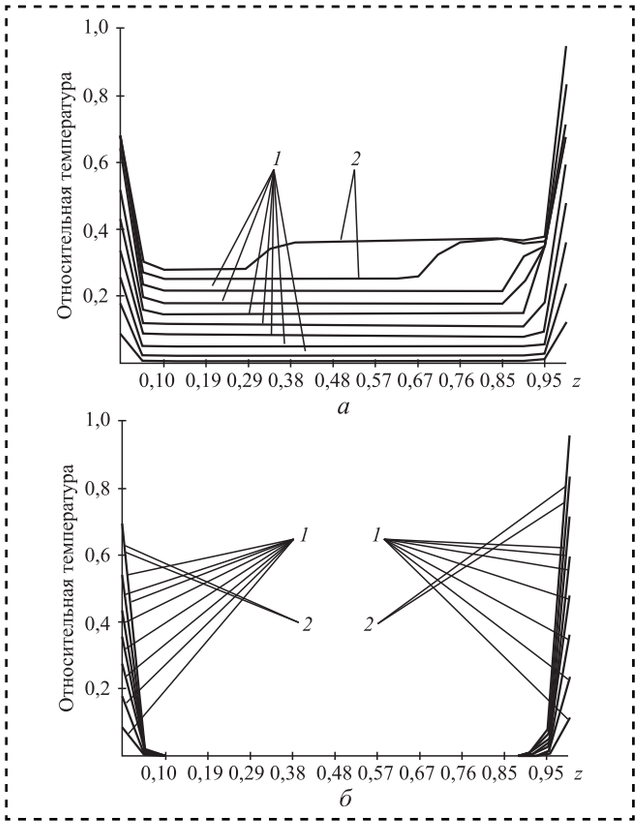


Рис. 3. Распределение температуры по осевой координате в заряде твердого топлива в сечении $r = 2\Delta r^1$, $\varphi = 2\Delta\varphi$ в 1-м слое (*а*) и в сечении $r = 2\Delta r^2$, $\varphi = 3\Delta\varphi$ во 2-м слое (*б*):

1 — на стадии роста температуры; *2* — при выдержке температуры

вого слоя, $\varphi = 2\Delta\varphi$ (рис. 3, *а*), а также в сечении $r = 2\Delta r^2$ второго слоя и $\varphi = 2\Delta\varphi$ (рис. 3, *б*). Граничные условия на переднем $\eta = 0$ и заднем $\eta = 21\Delta\eta$ днищах заряда выполнены точно. Внутренние точки заряда прогреваются медленно. Во втором слое (рис. 3, *б*) уровни температур всюду за исключением областей, прилегающих к торцам, имеют низкие значения.

Расчет одного варианта задачи продолжается в течение 9 ч 20 мин на ПЭВМ 1 ГГБ оперативной памяти с быстродействием 3,4 ГГц.

Заключение

Разработан обобщенный на пространственные краевые задачи нестационарной теплопроводности слоистых анизотропных сред метод прямой и обратной прогонки.

С использованием разработанного метода и алгоритма решения пространственных задач нестационарной теплопроводности построена математическая модель периодически изменяющегося по окружной координате трехмерного температурного поля в многослойных цилиндрах.

На основе математической модели получено численное решение пространственной задачи с разрывными граничными условиями.

Библиографический список

1. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. 724 с.

2. **Рапилбекова Н.С.** Термонапряженное состояние слоистых тел: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Алма-Ата, 1993.150 с.

3. **Юдаев Б.Н.** Техническая термодинамика. Теплопередача: учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1988. 479 с.

5. **Годунов С.К., Рябенький В.С.** Разностные схемы. М.: Наука, 1977. 400 с.

6. **Бахвалов Н.С.** Численные методы вычислений. М.: Наука, 1973. 631 с.

7. **Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л.** Численные методы. М.: Физматлит, 2004. 353 с.

8. **Гельфанд И.М.** Метод прогонки для решения разностных уравнений / С.К. Годунов, В.С. Рябенький // Введение в теорию разностных схем. М.: Физматгиз, 1962. 340 с.

9. **Каримбаев Т.Д., Рапилбекова Н.С.** Численная оценка устойчивости разностных уравнений теплопроводности для многослойных сред // Изв. Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 3. С. 98—102.

10. **Самарский А.А., Гулин А.В.** Устойчивость разностных схем. М.: Наука, 1973. 415 с.

11. **Рихтмайер Р.Д.** Разностные методы решения краевых задач. М.: Изд-во иностранной литературы, 1972. 262 с.

12. **Каримбаев Т.Д., Рапилбекова Н.С.** Численная оценка точности при пространственных дискретизациях уравнений теплопроводности // Изв. Самарского научного центра РАН. 2009. № 5. С. 138—143.

13. **Пинскер В.А.** Нестационарное температурное поле в полуограниченном теле, нагреваемым круговым поверхностным источником тепла // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44. № 1. С. 127—135.

14. **Пинскер В.А.** Температурное поле вблизи особой линии поверхности раздела анизотропных сред // ИФЖ. 2009. Т. 82. № 1. С. 157—162.

15. **Иванов В.И.** Расчет температурных полей в анизотропных телах // Изв. вузов. Авиационная техника. 2005. № 1. С. 74—76.

16. **Фахрутдинов И.Х.** Ракетные двигатели твердого тела. М.: Машиностроение, 1981. 224 с.

17. **Flywheel** Technology Symposium Proceeding // 23 National SAMPE, Symposium and Exhibition, San Francisco, 1978.

sb1016.indd 46 12.10.2016 10:34:22

К 100-летию со дня рождения

Иосифа Абрамовича Коганова

(12.07.1916—12.05.2001)

Международная научная конференция

"Современные проблемы формообразования сложных поверхностей деталей и сборки машин"

Тула 29—30 сентября 2016 г.

29 сентября на базе кафедры "Технология машиностроения" Политехнического института Тульского государственного университета прошла Международная очно-заочная научная конференция "Современные проблемы формообразования сложных поверхностей деталей и сборки машин", посвященная 100-летию со дня рождения почетного доктора ТулГУ, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ, лауреата премии ГОСОБРАЗОВАНИЯ СССР, лауреата премий им. С.И. Мосина, почетного профессора МГТУ "Станкин" Иосифа Абрамовича Коганова.

Участие в ней приняли представители высших учебных заведений и специалисты ведущих предприятий Азова, Брянска, Калуги, Кургана, Липецка, Москвы, Орла, Орска, Перми, Ростова-на-Дону, Рыбинска, Севастополя, Симферополя, Тулы и Челябинска. Свои доклады на конференцию прислали ученые из Вьетнама, ДНР, Казахстана, Китая, ЛНР, США, Узбекистана и Украины.

Работа конференции памяти профессора Коганова проходила по секциям:

1. Проблемы формообразования фасонных поверхностей деталей;
2. Вопросы резания материалов и проектирования специального инструмента;
3. Проблемы точности и качества обработки и сборки;
4. Специальные вопросы машиностроения.

В ТулГУ Иосиф Абрамович проработал в общей сложности 65 лет, пройдя путь от ассистента кафедры "Металлорежущие станки" до заведующего кафедрой "Технология машиностроения", становление которой связывают с его именем. И.А. Коганов основал и долгое время руководил научной школой технологии машиностроения ТулГУ, которая признана ведущей в Российской Федерации. Иосиф Абрамович — один из первых в истории вуза Почетных докторов ТулГУ. Это звание было присвоено ему в 1994 г.

Научно-педагогическая деятельность И.А.Коганова началась в 1946 г. в Тульском механическом институте (ТМИ) на кафедрах "Металлорежущие станки" и "Технология машиностроения".

С 1962 по 1989 гг. И.А. Коганов – заведующий кафедрой "Технология машиностроения" и научный руководитель отраслевой лаборатории технологии машиностроения (ОНИЛ-2).

Направления научной и практической деятельности лаборатории:

— разработка прогрессивных методов формообразования поверхностей деталей машин (совершенствование зуборезных процессов и технологии производства зубчатых колос, процессов резьбонарезания);

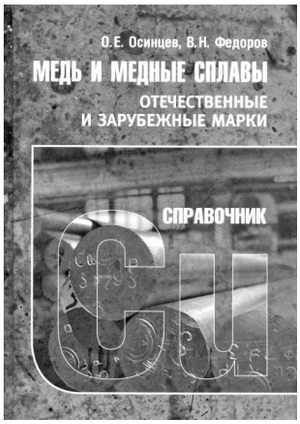
sb1016.indd 47 12.10.2016 10:34:22

— оптимизация комплектования сборочных единиц, обеспечивающих достижение высоких эксплуатационных характеристик с одновременным увеличением производительности сборочных процессов (технологии сопряженной обработки поверхностей на базе теории функционально связанных размерных цепей).

И.А. Коганов подготовил около 80 кандидатов и 10 докторов технических наук. Он автор свыше 230 научных работ (4 монографии, 60 изобретений, учебные пособия, методические руководства).

Научная школа "Прогрессивные технологические процессы формообразования сложных поверхностей и сборки высокоточных изделий", основанная профессором Когановым, получила дальнейшее развитие. С 2010 г. на базе кафедры ТМС функционирует научно-образовательный центр "Инновационные технологические процессы формообразования сложных поверхностей и сборки изделий". С 2015 г. подготовка студентов по направлению "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" полностью сконцентрирована на кафедре ТМС.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



МЕДЬ И МЕДНЫЕ СПЛАВЫ
ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МАРКИ
СПРАВОЧНИК
Осинцев О.Е., Федоров В.Н.
2-е изд., перераб. и доп. 2016. 360 с.
ISBN 978-5-9907638-3-8

В справочнике впервые систематизированы и обобщены сведения о физических, механических и технологических свойствах почти всех марок меди и сплавов на ее основе: латуней, бронз, медно-никелевых сплавов, а также специальных медных сплавов: микролегированных, дисперсно-упрочненных, с эффектом памяти и др. Показано влияние легирующих элементов и примесей на свойства сплавов. Изложены сведения о составе и структуре, особенностях термической обработки, даны двойные и многокомпонентные диаграммы состояния, определяющие фазовый состав. Приведены также сведения о свойствах зарубежных аналогов отечественных медных сплавов. 2-е издание (1-е издание 2004 г.) переработано в соответствии с новыми стандартами, а также дополнено сведениями по припоям на основе меди.

Для инженерно-технических работников машиностроительных, металлургических и металлообрабатывающих предприятий, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, а также для студентов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений и университетов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:
по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.
Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 08.08.2016. Подписано в печать 00.09.2016. 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.

sb1016.indd 48 12.10.2016 10:34:22